



## *Vorstellung der Firma EBEHAKO electronic GmbH*

Das Unternehmen wurde 1922 in Zwickau als Elektrizitäts-, Bau-, und Handels Kommanditgesellschaft von 3 Gesellschaftern gegründet. Die Tätigkeit bestand zunächst im Elektroservice für die Bevölkerung sowie im Handel. Später erfolgte der Aufbau einer Elektrofertigung.

Seit den 1950er Jahren wurden eigene Geräte gefertigt – unter anderem die ersten Blindleistungsregler in der damaligen DDR. Es war der einzige Betrieb für die Herstellung derartiger Geräte. Dementsprechend wurde auch eine hohe Stückzahl in den Ostblock exportiert.

Nach der Wende erfolgte die Gründung der „EBEHAKO electronic GmbH“ durch Ausgründung aus der weiter bestehenden EBEHAKO Elektrotechnik. 1994 konnte ein eigenes Firmengebäude bezogen werden.

Es folgten die Entwicklung einer neuen Generation von Blindleistungsreglern, Meßgeräten sowie weitere Produktentwicklungen, die aber immer den Fokus auf dem Thema Blindleistungskompensation hatten.

So versteht sich die Firma heute als Systemzulieferer einer Vielzahl namhafter deutscher und ausländischer Firmen auf diesem speziellen Gebiet.

# **INHALT**

	<b>Seite</b>
(1) <u>Theoretische Grundlagen und Definitionen</u>	4
(2) <u>Energiefluß im Netz - Entstehung von Blindleistung</u>	9
(3) <u>Aufbau und Funktion von Kompensationsanlagen</u>	12
(4) <u>Vorteile und praktische Einsparungen durch Kompensationsanlagen</u>	25
(5) <u>Grundlagen der Planung von Kompensationsanlagen</u>	27
• Kompensationsleistung	
• Stufenleistung	32
• Verdrosselungsgrad	34
• Spannungsfestigkeit der Kondensatoren	37
• Reaktionszeit	40
• Ökonomische Auswahlkriterien	42
• Auswahl der Stromwandler	44
(6) <u>Wissenswertes über Blindleistungsregler</u>	48
Anforderungen und Typen	
(7) <u>Spezielle Applikationen von Kompensationsanlagen</u>	51
• Gemischt-dynamische Anlagen	
• Kaskadierung von Blindleistungsreglern	52
• Kopplung von 2 Kompensationsanlagen	53
• Kopplung mehrerer Anlagen	54
(8) <u>Problem: Oberschwingungen</u>	55
Filter als Sonderformen der Kompensation	
• Passive Filter	62
• Aktive Filter	65

## (1) Theoretische Grundlagen und Definitionen

### *Blindleistung*

Im elektrischen Energieversorgungsnetz soll Energie vom Erzeuger zum Verbraucher übertragen werden. In mit Einphasen- bzw. Dreiphasenwechselstrom (Drehstrom) betriebenen Netzen fließt häufig mehr Energie zwischen dem Erzeuger (Kraftwerk) und einem elektrischen Verbraucher (beispielsweise elektrische Maschine), als im Verbraucher tatsächlich umgesetzt wird.

Warum?

Viele elektrische Verbraucher funktionieren nur auf der Basis eines Magnetfeldes.

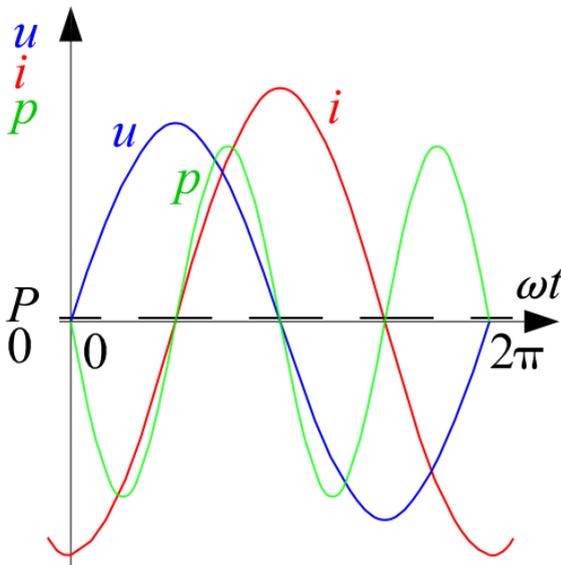
Bei einem induktiven Verbraucher (z. B. Drosselspule, Transformator, Asynchronmotor) wird vom Erzeuger gelieferte Energie verwendet, um das magnetische Feld aufzubauen. Diese Energie wird zunächst im Magnetfeld gespeichert, jedoch mit dem periodischen Wechsel im Vorzeichen der Spannung wird das Feld wieder abgebaut und die Energie ins Netz zurückgespeist.

Diese zusätzliche Energie pro Zeit, die nichts zur Wirkleistung („nutzbare Leistung“) beiträgt, ist im Allgemeinen unerwünscht und wird als Blindleistung bezeichnet. Diese pendelt zwischen Erzeuger und Verbraucher und ist nur für den Erhalt des Magnetfeldes zuständig.

Wirkenergie und Blindenergie werden beim Verbraucher mit verschiedenen Zählern registriert.

Das Pendeln der Energie soll hier anhand des zeitlichen Verlaufes von Strom und Spannung noch einmal verdeutlicht werden.

Bei rein induktiver Belastung läuft der Strom der Spannung um eine Viertelperiode nach, der Phasenverschiebungswinkel beträgt somit  $90^\circ$ . Das Produkt aus  $U$  und  $I$  befindet sich abwechselnd im positiven und negativen Bereich, wobei die Frequenz der Leistung die doppelte der Grundfrequenz ist. Wenn sich die Leistung  $P$  im negativen Bereich befindet, bedeutet das, dass Energie in das Netz zurückgeliefert wird. Die Leistung schwankt um ihre mittlere Höhe null. Sie erzeugt „blinden“ Stromfluss.



Für diesen Fall ergibt sich:

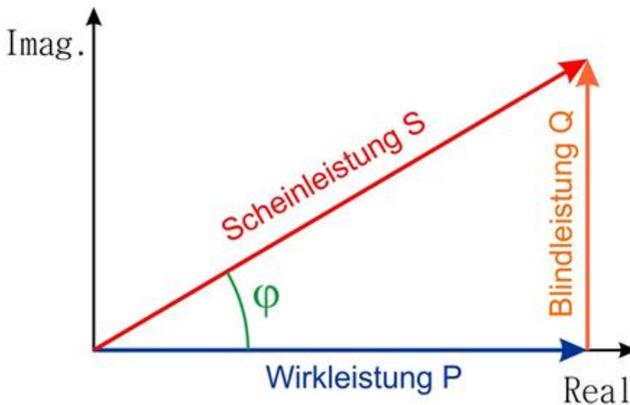
$$Q = U \cdot I \cdot 1 = S; \quad P = 0$$

Entsprechendes gilt auch für kapazitive Verbraucher (z. B. Kondensatormotoren, Erdkabel), die jedoch statt des magnetischen ein elektrisches Feld erzeugen, das eine Phasenverschiebung zwar in der anderen Richtung verursacht, aber sonst dasselbe liefert: Die zum Auf- und Abbau des Feldes transportierte Energie stellt Blindleistung dar.

Die Blindleistung tritt in der Regel bei allen am Netz angekoppelten Komponenten und auch beim Leitungsnetz selbst auf. Da in einem Stromkreis im Prinzip immer die drei Eigenschaften Kapazität, Induktivität und ohmscher Widerstand vorhanden sind, liegt in einem Wechselstrom-Versorgungsnetz praktisch immer eine Blindleistungsbelastung vor.

### Leistungen / Leistungsfaktor

Betrachten wir nun die Blindleistung in der Gesamtheit der Leistungen im Netz:



$\varphi$  = Phasenverschiebungswinkel

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

### Wirkleistung $P$ - Einheit Watt ( $W$ )

ist die Leistung, die für die Umwandlung in andere Leistungen (mechanisch, thermisch) direkt verwendbar ist.

Da wir uns im Wechselspannungsnetz befinden ist die Leistung für periodische Spannungen und Ströme über die Periodendauer  $T$  zu ermitteln.

Bei ohmschen Verbrauchern verlaufen Spannung und Strom gleichphasig. Es ergibt sich eine sinusförmige reine Wirkleistung. Treten im Wechselstromnetz zusätzlich kapazitive oder induktive Verbraucher auf, tritt eine Verschiebung des Phasenwinkels zwischen Strom und Spannung auf, welcher zur Entstehung von Blindleistung führt.

Die bereits beschriebene **Blindleistung  $Q$  - Einheit VAR ( $var$ )** kann induktiven bzw. kapazitiven Ursprungs sein.

Induktive Blindleistung wird im Zeigerdiagramm positiv (nach oben) dargestellt (s. Bild Seite 6), kapazitive Blindleistung entsprechend negativ (Pfeilrichtung nach unten)

Die **Scheinleistung  $S$  - Einheit VA** (auf die alle elektrischen Berechnungen ausgelegt werden) ist die geometrische Summe aus Wirk- und Blindleistung. Je kleiner die Blindleistung, desto mehr nähert sich die Scheinleistung der Wirkleistung an.

Im Idealfall (keine Blindleistung) entspricht die Scheinleistung der Wirkleistung  $S = P$

Als Leistungsfaktor  $\lambda$  (Wirkleistungsfaktor) bezeichnet man das Verhältnis der Wirkleistung  $P$  zur Scheinleistung  $S$ . (*gesamte Scheinleistung unter Berücksichtigung der Oberschwingungen*)

**Leistungsfaktor  $\lambda = |P| / S$**

Er kann zwischen 0 und 1 liegen.

In Verteilnetzen wird zur Vermeidung von Übertragungsverlusten ein möglichst hoher Leistungsfaktor angestrebt (Ideal 1;  $P = S$ )

Bei sinusförmigen Größen wird der Wirkfaktor definiert.

Er entspricht dem Verhältnis Wirkleistung zu Scheinleistung ( $P / S$ ) - bezogen auf die Grundschwingung (Sinus) - und ist gleich dem Kosinus des Verschiebungswinkels  $\varphi$ .

**Wirkfaktor  $\cos \varphi = P / S$**

Ideal wäre somit ein  $\cos \varphi$  von 1.0

(Verschiebungswinkel  $\varphi = 0$ : keine Blindleistung)

In der Praxis (Deutschland) wird dem Kunden in der Regel Blindleistung in Rechnung gestellt, wenn diese mehr als 50% der bezogenen Wirkleistung beträgt. Das entspricht einem  $\cos \varphi$  schlechter (kleiner) 0,9 induktiv. Der Kunde wird daher einen dauerhaften  $\cos \varphi$  besser als 0,9 anstreben. Der mit einer Kompensationsanlage standardmäßig erreichbare Ziel  $\cos \varphi$  liegt bei 0,98.

### **Merke:**

Gewerbliche Verbraucher haben getrennte Wirk- und Blindleistungszähler. Die Wirkleistung wird zu 100% bezahlt, an Blindleistung muß der Anteil bezahlt werden, der 50% der Wirkleistung übersteigt. (Deutschland) Dies entspricht einem  $\cos \varphi$  von 0,9.

Daher sind alle gewerblichen Verbraucher interessiert, den Blindstromanteil so gering wie möglich zu halten. Bei Privat- und Kleinverbrauchern wird Blindleistung nicht separat abgerechnet.

### **Eine Verbesserung des Leistungsfaktors bewirkt unter anderem:**

- Verringerung des zu übertragenden Stromes (Scheinstrom) im Netz; d.h. Entlastung der Übertragungsleitungen bzw. Erhöhung des übertragbaren Wirkstromes (Wirkleistung) bei gleichem Leitungsquerschnitt
- Erhöhung der verfügbaren Leistung am Transformator
- Verringerung der Transformatorverluste
- Verminderung des Spannungsabfalls an Leitungen (insbesondere an Mittel- und Hochspannungsleitungen sind die Verluste gravierend)

Beispiel Übertragungsleitungen:

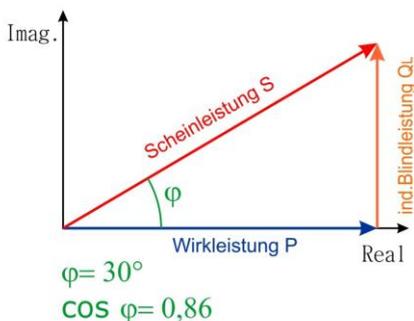
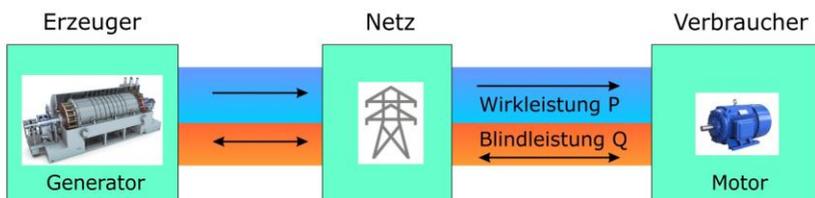
Bei einer Übertragungsleistung von 300 kW betragen die Leistungsverluste:  
bei  $\cos\text{-}\Phi = 0,6$ : ca. 16,7 kW (5,5%)  
bei  $\cos\text{-}\Phi = 1,0$ : ca. 6,0 kW (2%)

Quelle: (1)

## (2) Energiefluss im Netz – Entstehung von Blindleistung

Betrachten wir den Energiefluss am Beispiel eines induktiven Verbrauchers. Die erzeugte und zu übertragende Gesamtleistung (Scheinleistung) teilt sich auf in einen Anteil für Wirk- und Blindleistung. Die Wirkleistung kann für die tatsächlich zu verrichtende Arbeit genutzt werden, während die Blindleistung für den Aufbau des Magnetfeldes benötigt wird. Beim Abbau des Magnetfeldes wird diese Energie ins Netz zurückgespeist – sie „pendelt“ und erzeugt „blinden“ Stromfluss. Die induktive Blindenergie ist im Allgemeinen unerwünscht und wird als Blindleistung bezeichnet.

### Energiefluß unkompensiert

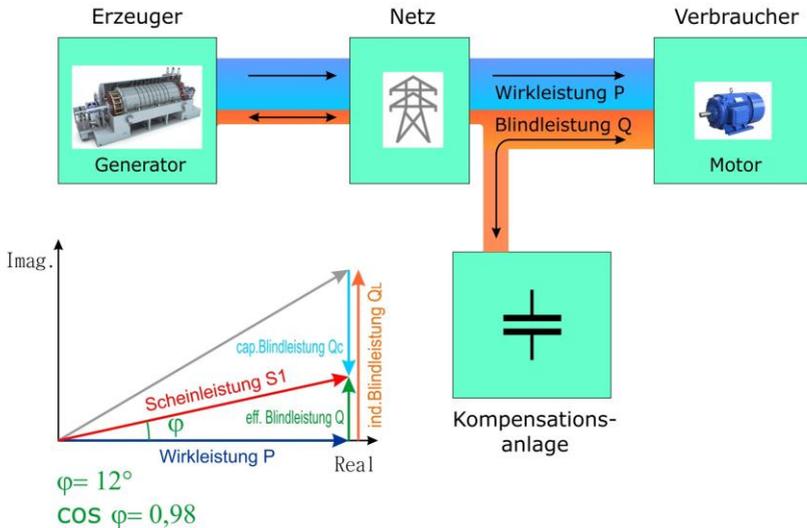


Die Einheit der Leistung ist das Watt (W)  
In der Energietechnik werden vorwiegend für die Scheinleistung das Voltampere (VA) und für die Blindleistung das Var (var) benutzt; dabei gilt  $1 \text{ var} = 1 \text{ VA} = 1 \text{ W}$ .

Im Zeigerdiagramm werden die Leistungen nochmals verdeutlicht. Die Scheinleistung ist die geometrische Summe aus Wirk- und Blindleistung. Bei der rein induktiven Blindleistung läuft der Strom der Spannung eine Viertelperiode nach; daher der Verschiebungswinkel (zwischen Wirk- und Blindleistung) von  $90^\circ$ !

Im Beispiel beträgt der Phasenverschiebungswinkel  $\Phi=30^\circ$  und der Wirkfaktor  $\cos \varphi = 0,86$  (schlecht) Wie zu sehen ist muß die gesamte Scheinleistung vom Erzeuger bereitgestellt und übertragen werden und belastet somit die Leitungen.

## Energiefluß kompensiert



Das Prinzip der Kompensation besteht im Ausnutzen der Tatsache, daß ein induktiver Blindstrom durch Addition eines kapazitiven Blindstromes gleicher Größe vollständig kompensiert (eliminiert) werden kann. Im Zeigerdiagramm dazu (grau) die unkompenzierte Scheinleistung aus dem vorherigen Bild.

Durch Parallelschalten einer rein kapazitiven Last (ein oder mehrere Leistungskondensatoren) zur vorhandenen induktiven Last wird ein zusätzlicher kapazitiver Blindstrom erzeugt, der zum induktiven Blindstrom  $180^\circ$  verschoben ist. Er wirkt diesem also entgegen und mindert den Gesamtblindstrom.

Die **ursprüngliche induktive Blindleistung** ist hier orange Q dargestellt.

Die durch die Kompensationsanlage **zusätzlich erzeugte kapazitive Blindleistung** hellblau. Es verbleibt eine kleine **Restblindleistung** (grün)

Aus dieser Übersicht sind bereits folgende Vorteile einer Kompensation ersichtlich:

- Die Blindleistung "pendelt" nur noch zwischen Verbraucher und Kompensationsanlage
- Die vom Generator bereitzustellende Scheinleistung verringert sich wesentlich aufgrund der gesunkenen Blindleistung.
- Im Beispiel verringert sich der Phasenwinkel  $\varphi$  von  $30^\circ$  auf  $12^\circ$ ; dies entspricht einer Verbesserung des  $\cos \varphi$  von 0,86 auf 0,98

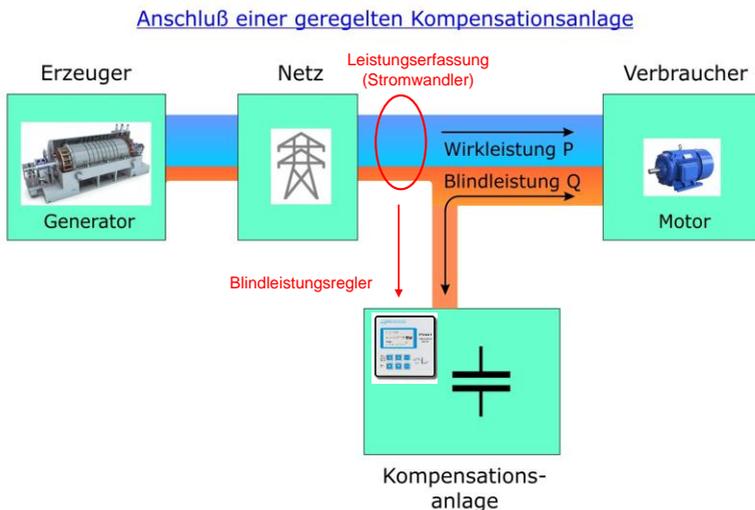
## Anschluß einer geregelten Kompensationsanlage

Um den induktiven Blindstrom in einer Anlage vollständig zu kompensieren müssen also nur Kondensatoren der jeweils richtigen Leistung den Verbrauchern parallelgeschaltet werden.

Das normale Lastprofil eines Betriebes oder einer Produktionsanlage ändert sich jedoch ständig. (Zu- und Abschalten von Verbrauchern, verschiedene Belastungen der Maschinen)

Daher bietet sich eine zentrale Kompensation nahe der Einspeisung (NSHV) an, welche den gesamten momentanen Blindstrom erfasst, auswertet und entsprechend soviel Kondensatorleistung zuschaltet, wie nötig ist den Ziel  $\cos \varphi$  zu erreichen.

Dies geschieht in einer geregelten Kompensationsanlage durch stufenweises Zuschalten verschiedener Leistungskondensatoren.



Zur Erfassung der momentanen Blindleistung ist ein Stromwandler in der Einspeisung notwendig, der den gesamten Strom sowohl der Verbraucher als auch der Kompensation erfasst.

**Merke:** Der Stromwandler muß in der Einspeisung vor der Kompensation installiert werden um Verbraucherstrom und Kompensationsstrom zu erfassen!

Ein Blindleistungsregler wertet die gemessene Blindleistung aus und schaltet soviel kapazitive Leistung zu, wie notwendig ist den gewünschten Ziel  $\cos \varphi$  zu erreichen.

### (3) Aufbau und Funktion von Blindleistungskompensationsanlagen

Wir unterscheiden nach Kompensationsart zwischen Einzel-, Gruppen- oder Zentralkompensation.

Bei der Einzelkompensation wird dem einzelnen Verbraucher ein der induktiven Leistung entsprechender Leistungskondensator fest parallelgeschaltet. Dies funktioniert jedoch nur bei konstanter Last und wenigen Verbrauchern.

Die Gruppenkompensation entspricht prinzipiell der Einzelkompensation, jedoch für mehrere parallele Verbraucher (Gruppe). Durch Zusammenfassen der Verbraucher (z.B. Leuchtbänder) und Berücksichtigung des Gleichzeitigkeitsfaktors für die Einschaltdauer kann die Kondensatorleistung optimiert werden. Die Kondensatoren sind ebenfalls fest parallelgeschaltet.

An dieser Stelle soll jedoch die geregelte Zentralkompensation näher erklärt werden, da diese die Hauptanwendung darstellt.

Sie befindet sich an zentraler Stelle, meist in der Hauptverteilung in der Nähe des Trafos und regelt mithilfe eines Blindleistungsreglers den gesamten Blindleistungsbedarf des angeschlossenen Netzes.

Betreibt der Verbraucher eine funktionierende Kompensationsanlage, so entfallen im Idealfall sämtliche Mehrkosten aufgrund von Blindleistung.

Ziel einer Blindleistungskompensationsanlage ist somit das möglichst zeitnahe Zuschalten mehrerer Kondensatoren einer Größe, die notwendig ist die momentane induktive Blindleistung vollständig zu kompensieren.

Ideal: Scheinleistung  $S =$  Wirkleistung  $P \rightarrow$  Blindleistung  $Q=0$

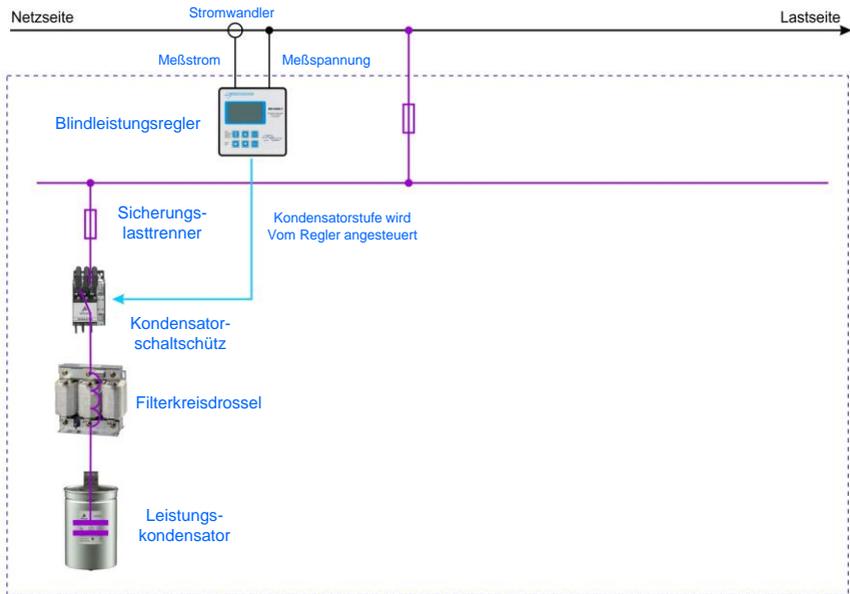
In der Praxis wird ein Ziel  $\cos \varphi$  von 0,9... 0,95 (ind) angestrebt, da eine Überkompensation normalerweise nicht erwünscht ist.

Die Aufgaben einer Kompensationsanlage sind daher:

- Verringerung der Strombezugskosten
- Verbesserung des Leistungsfaktors
- Verringerung der Leitungsverluste
- Schaffung von Leistungsreserven
- Umweltschonender Energieeinsatz

## Aufbau einer geregelten Standard-Kompensationsanlage

Darstellung: Ein Kondensatorabzweig (1. Stufe) - gibt die Stufenleistung der Anlage vor.



Kernstück der Anlage ist der Blindleistungsregler.

Dieser mißt die Netzparameter Spannung und Gesamtstrom. (je nach Ausführung nur in einer Phase oder in allen 3 Phasen L1...L3)

Hieraus errechnet er die elektrischen Größen Wirk-, Blind- und Scheinleistung sowie den aktuellen  $\cos \varphi$ .

Gemäß einem vorgegebenen Ziel- $\cos \varphi$  errechnet das Gerät die kapazitive Blindleistung, die notwendig ist diesen Zielwert zu erreichen. (Differenzblindleistung)

Entsprechend weiterer Vorgaben schaltet der Blindleistungsregler die notwendige Anzahl von Kondensatoren ans Netz und kompensiert mit dieser kapazitiven Last die induktive Blindleistung.

Jede Kondensatorstufe wird über entsprechende NH Sicherungen separat abgesichert.

Das Schalten der Kondensatoren erfolgt über spezielle Kondensatorschalterschütze. Diese besitzen einen voreilenden Kontakt (mit Vorwiderstand bzw. Drossel) zur Kondensatorvorladung zur Begrenzung des hohen Einschaltstroms des Kondensators.

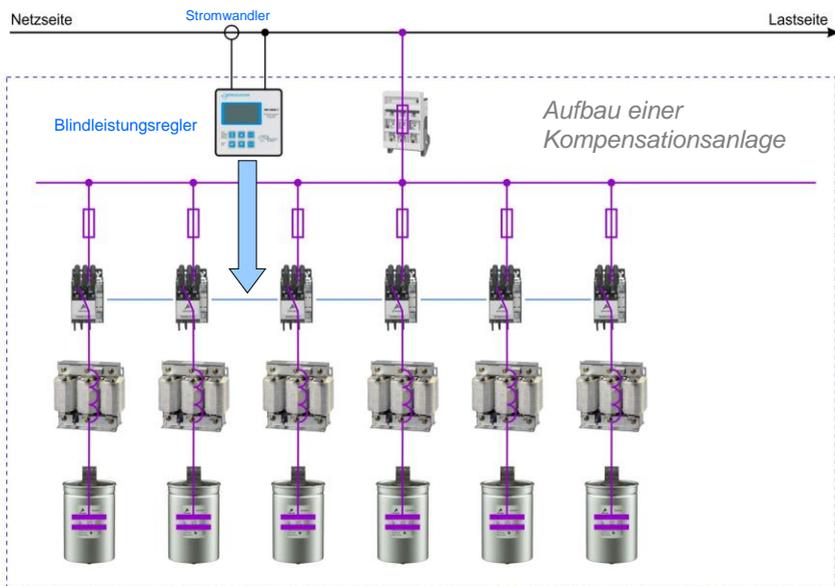
(leerer Kondensator = Kurzschluss am Wechselstromnetz)

Die Filterkreisdrossel dämpft die Wirkung möglicher Oberschwingungen im Netz auf den Kondensator. Durch auftretende Harmonische der Spannung im Netz, verursacht durch nichtlineare Verbraucher wie Leistungssteller, Frequenzumrichter u.ä. würden im Kondensator zusätzliche Oberwellenströme entstehen, die den Kondensator zusätzlich elektrisch und thermisch belasten und im ungünstigsten Fall zerstören könnten. Die Drossel vermeidet die Überlastung durch gezielte Dämpfung der Oberwellenströme.

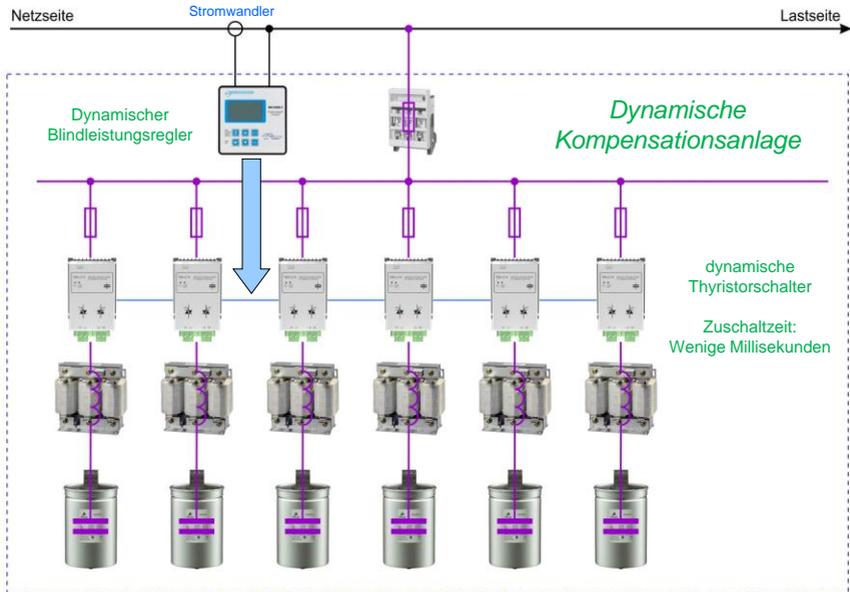
Die auftretenden Harmonischen sind ungeradzahlige Vielfache der Grundschwingung 50Hz. Auf diese Oberschwingungen wird in Kapitel 8 noch näher eingegangen.

Die komplette Kompensationsanlage besteht aus mehreren Kondensatorenstufen, die unterschiedlichen Kapazitäten haben können. Der Regler "kennt" die Größe der einzelnen Abzweige und kombiniert deren Leistung so, dass die gemessene aktuelle induktive Blindleistung der Verbraucher kompensiert wird.

Komplette Anlage mit 6 Stufen:



## Prinzip einer dynamischen Kompensationsanlage



Der Begriff ergibt sich aus den schnellen Schaltzeiten, die mit dieser Anlage möglich sind und ein dynamisches Folgen der Kompensation (fast in Echtzeit) auf die Laständerungen im Netz ermöglichen.

### Zum Vergleich:

Eine konventionelle Kompensationsanlage besitzt aufgrund der notwendigen Entladezeit der Kondensatoren eine Wiedereinschaltzeit von ca. 40-60 sek. (Diese Entladung geschieht durch interne Entladewiderstände) Anderenfalls könnte der Kondensator beim Zuschalten des Netzes zerstört werden (Schütz schaltet undefiniert in Bezug auf Phasenlage - bei Phasenopposition: zu hohe Ströme)

Der Unterschied zu einer konventionellen Anlage besteht im Ersatz der Schaltschütze durch elektronische Schalter und den Einsatz eines dynamischen Blindleistungsreglers, der diese Schalter ansteuern kann. Eine dynamische Kompensation vermeidet den Nachteil der langen Wiedereinschaltzeiten, da die Schalter innerhalb weniger Millisekunden schalten und auch Wiedereinschalten können (dies wird gelöst durch das

Schalten im Scheitelpunkt der Spannung bei Spannungsgleichheit zwischen Kondensator und Netz) Hierdurch wird ein sanftes Einschalten der Kondensatoren erreicht, eine Einschaltstromspitze wie bei den Schützen gibt es nicht. Die Lebensdauer der Kondensatoren erhöht sich.

### *Merkmale und Vorteile dynamischer Kompensation:*

- hohe Schaltgeschwindigkeit (nahezu verzögerungsfrei)
- für Lasten mit kurzer Kompensationszeit (Schweißmaschinen)
- keine Sperrzeit notwendig
- verschleißfreies transientenfreies Schalten
- unbegrenzte Schaltspiele
- wartungsfrei



Dynamische  
Kompensationsanlage

*Quelle: (2)*

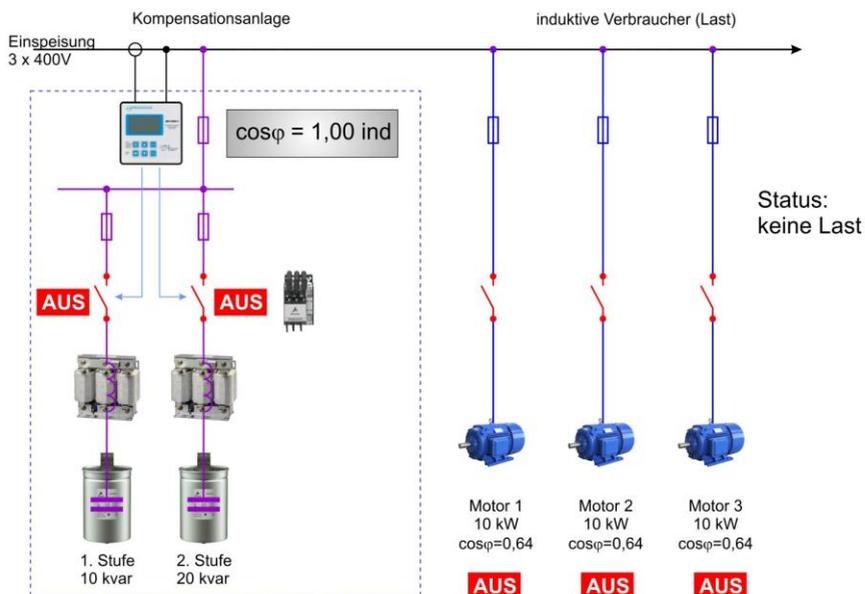
## Wirkungsweise einer Kompensationsanlage in der Praxis.

Die Kompensation befindet sich (elektrisch) vor den einzelnen Verbrauchern und erfasst sowohl deren Strom als auch den eigenen Kompensationsstrom.

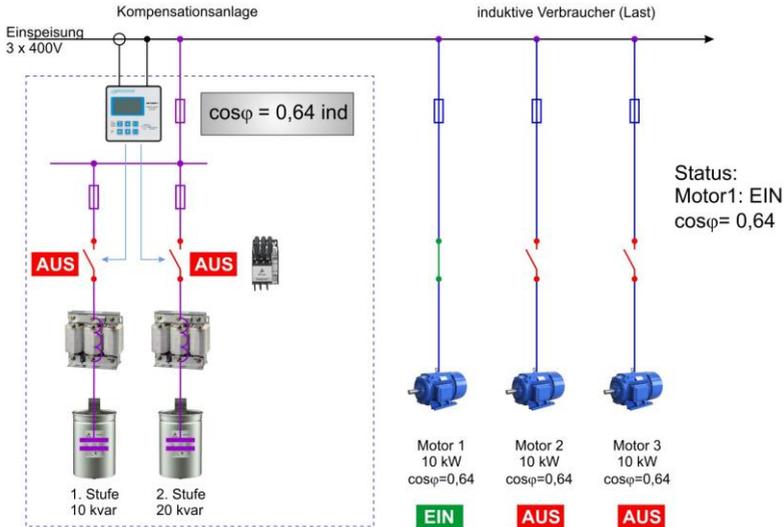
Zur Veranschaulichung bestehen die Verbraucher hier aus 3 gleich großen Motoren von je 10 kW und die Kompensation aus nur 2 Stufen mit 10 bzw. 20 kvar.

1.) Alle Verbraucher sind aus. Es gibt keine Blindleistung.

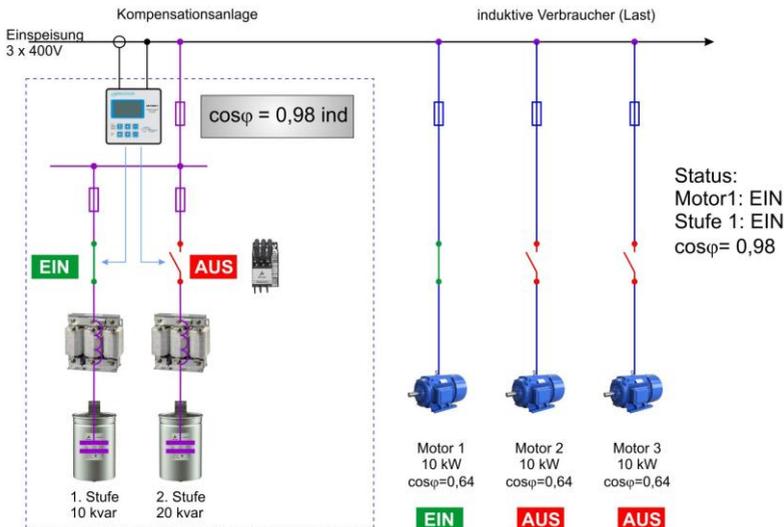
Der Leistungsfaktor = 1, es werden keine Kondensatorstufen geschaltet.



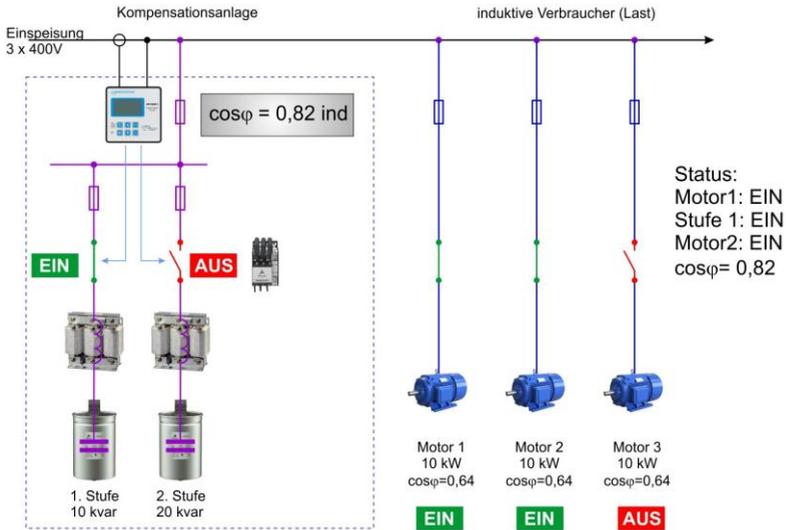
2) Beim Zuschalten eines Motors von 10kW und einem  $\cos \varphi$  von 0,64 ergibt sich eine Blindleistung von 10kvar ind. Diese wird vom Blindleistungsregler erfasst und angezeigt:



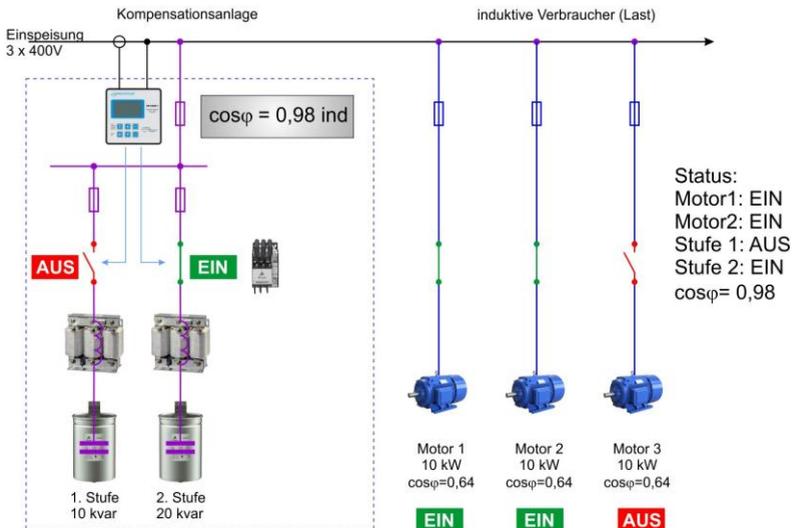
3) Als Reaktion darauf schaltet der Regler die 1. Kompensationsstufe von 10kvar (cap) zu, was den  $\cos \varphi$  des Netzes auf 0,98 ind anhebt und damit dem Ziel  $\cos \varphi$  entspricht. Die Anlage ist auskompensiert:



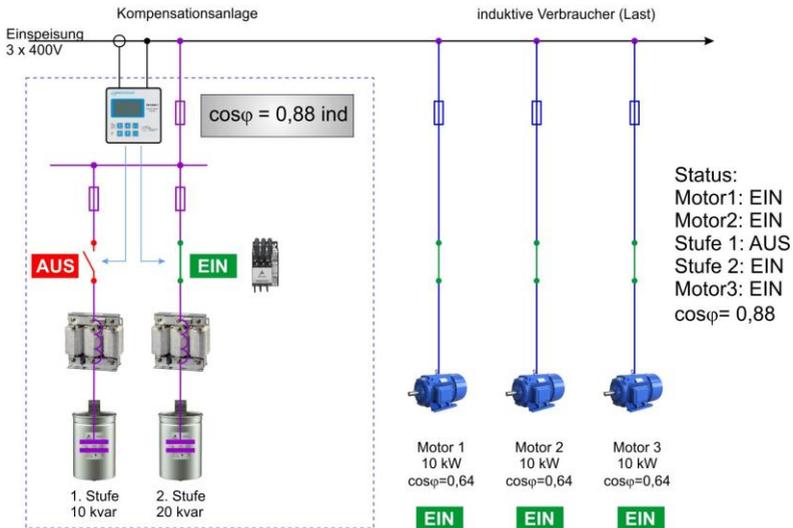
4) Das Zuschalten eines weiteren Verbrauchers führt wiederum zu einer Verschlechterung des Leistungsfaktors - hier auf 0,82 ind.:



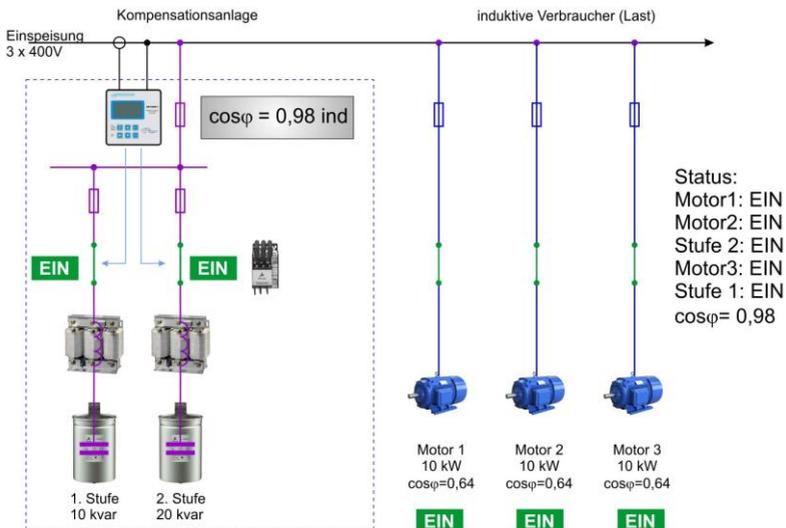
5) Der Regler schaltet nun die erforderlichen 20kvar zu, indem die 2. Stufe (20kvar) zugeschaltet und die 1. Stufe von 10kvar abgeschaltet wird. Wieder wird der Ziel  $\cos\varphi$  von 0,98 erreicht:



6) Das Zuschalten des 3. Motors bewirkt eine Verschlechterung des  $\cos \varphi$  auf 0,88 ind.



7) Der Regler kompensiert diese induktive Blindleistung durch das zusätzliche Zuschalten des 1. Kondensators, so dass nun 30 kvar kapazitiv ans Netz geschaltet sind. Der Ziel- $\cos \varphi$  von 0,98 ind. ist wieder erreicht:



Im Beispiel erkennt man das Schalten in einer sogenannten Regelreihe. Hier ist es die Regelreihe 1-2, d.h. der ersten Stufe wird die Wertigkeit 1 zugeordnet, alle weiteren Stufen beziehen sich dann auf diese erste Stufe. Hier hat die 2. Stufe die Wertigkeit 2: also 20kvar. Durch Nutzung von Regelreihen, die mit Kondensatorstufen verschiedener Größe arbeiten, kann die Anzahl der Ausgänge des Reglers verringert werden. In unserem Beispiel konnten wir mit 2 Ausgängen die kapazitiven Lasten 10 / 20 / 30kvar schalten.

In einer Regelreihe 1:2:4 könnten mit 3 Ausgangsstufen (3 Kondensatoren verschiedener Leistung) bereits 7 verschiedene Leistungen geschaltet werden:

Stufe	kvar	Wertigkeit	Schaltmöglichkeit						
			10 kvar	20 kvar	30 kvar	40 kvar	50 kvar	60 kvar	70 kvar
1.Stufe	10 kvar	1	X		X		X		X
2.Stufe	20 kvar	2		X	X			X	X
3.Stufe	40 kvar	4				X	X	X	X
Leistung:			10 kvar	20 kvar	30 kvar	40 kvar	50 kvar	60 kvar	70 kvar

Der Regler schaltet die Stufen binär zu - entsprechend Ihrer Wertigkeit. Die Wertigkeit 1 bezieht sich immer auf die erste Stufe (hier 10kvar)

Bei ordnungsgemäßer Planung und Auslegung der Kompensationsanlage entsprechend der vorhandenen Verbraucher kann der Blindleistungsregler also problemlos die anfallende Blindleistung kompensieren.

## Anwendung dynamischer Kompensation

Einsatzfälle sind typischerweise alle Anwendungen, in denen schnelle Lastschwankungen die Regel sind, wie z.B.

### Krane



### Elevatoren/ Aufzüge

### Pressen



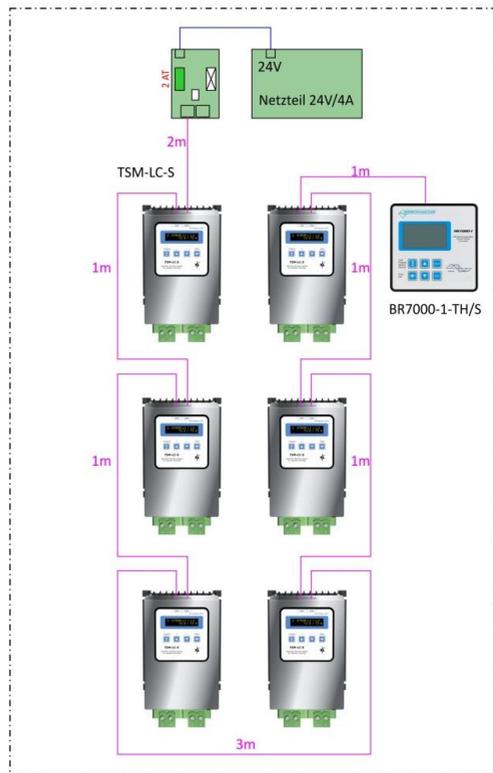
### Schweißmaschinen

Die Reaktionszeiten der Kompensation bei diesen Prozessen müssen zwischen einigen Millisekunden (bei Schweißanlagen) und einigen Sekunden bei den anderen erwähnten Anwendungen liegen. Eine konventionelle Kompensation mit Schaltzeiten von 40 - 60 Sekunden würde viel zu langsam sein und keine Wirkung zeigen.

*Moderne selbstüberwachende dynamische Kompensationsanlage*

Die bei dynamischen Kompensationsanlagen derzeit wohl modernste Version besteht in der Nutzung von vernetzten intelligenten Thyristorschaltern.

Der eingesetzte Thyristorschalter überwacht den echten Kondensatorstrom, die Spannung und die Temperatur jedes Abzweiges. Diese Werte werden über die bidirektionale Netzwerkverbindung zum Regler übertragen und dort in Echtzeit ausgewertet.

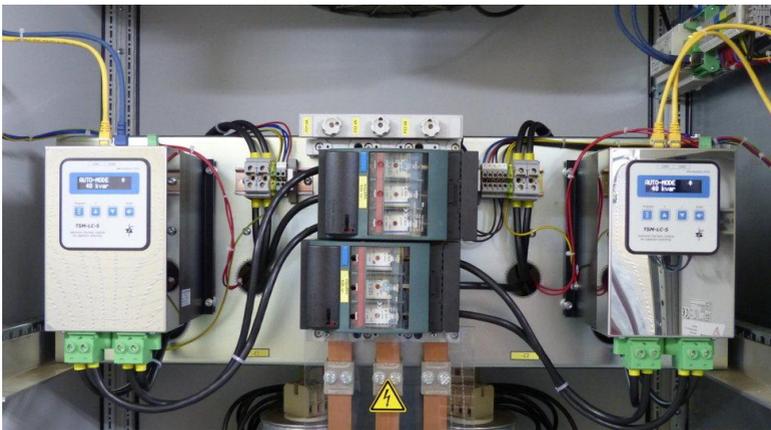


Der Vorteil besteht in der direkten Erkennung von Kondensatorproblemen und deren Anzeige bzw. Auswertung. Durch ein intelligentes Temperaturmanagement werden zudem immer die Stufen mit der niedrigsten Temperatur zugeschaltet.

Die Installation in der Anlage erfolgt über handelsübliche Patch-Kabel, sodass Verdrahtungsfehler faktisch ausgeschlossen sind.

Es können bis zu 32 Schaltstufen vom Regler angesteuert werden, was in der Praxis mehr als ausreichend ist. Die Schaltzeit liegt bei ca. 20 ms.

Zusätzlich ist die Ansteuerung von konventionellen schützgeschalteten Stufen möglich, womit auch der Aufbau von gemischten Hybridanlagen realisiert werden kann.



#### (4) Praktische Beispiele für Einsparungen durch Kompensationsanlagen



##### *1.) Einsparung durch Reduktion der Blindstromkosten:*

Wir betrachten eine Musterfirma mit einer Anschlussleistung von 500kW, einem Gleichzeitigkeitsfaktor von 0,8 und einem durchschnittlichen  $\cos \varphi$  von 0,7. Die Betriebsdauer sei 4000 Std./a

Um einen  $\cos \varphi = 0,9$  zu erreichen ist eine Kompensationsleistung von 268 kvar notwendig => wir betrachten eine Standardanlage von 300 kvar.

Die Abrechnung sieht folgendermaßen aus:

- Arbeit:	1.600.000 kWh
- Blindarbeit:	1.635.526 kvarh
- Blindarbeit frei (50%)	800.000 kvarh
- Blindarbeit zu bezahlen:	835.526 kvarh

Bei angenommenen Blindarbeitskosten von ca. 1 cent/ kvarh ergibt sich bei einer Investition von einmalig ca. 7.500 € für die Anlage eine jährliche Einsparung von ca. 8.355 €.

Der „Return of Investment“ ist also sehr kurz und die Einsparung in den Folgejahren erheblich!

Quelle: (1)

## *2.) Einsparung durch Verringerung der Wirkenergiekosten*

Die genannte Fa. hätte einen 800 kVA Trafo im Einsatz.

Die Verluste in Trafo und Zuleitungen können bei einer mittleren Scheinleistung von 572 kVA mit 10 kW angenommen werden.

Durch Kompensation lassen sich die Trafo- und Leitungsverluste um ca. 3kW senken! Abzüglich des Eigenbedarfs der Kompensation bleibt eine Einsparung von ca. 2,2 kW.

Dies entspricht bei den angenommenen 4000 Betriebsstunden im Jahr einer Verlustarbeit von 8800 kWh und damit einer zusätzlichen Einsparung von 880 €.

## *3.) Einsparung durch Reduktion der Leistungsspitzen*

Gemäß Sondertarifvertrag zahlen die meisten Firmen zwischen 20 und 40€/kVA für die bereitgestellte Leistungsspitze. In unserem Beispiel lässt sich die Leistungsspitze mit der Kompensationsanlage von 300 kvar um ca. 170 kVA senken.

(Der genaue Wert hängt natürlich vom tatsächlichen Stromverlauf ab)

Durch Senkung der Spitze könnten die jährlichen Kosten um 3400 bis 6800€ gesenkt werden.

Hier ist ebenfalls ein erhebliches Einsparungspotential gegeben.

## *4.) Einsparung durch verringerte Investitions- und Folgekosten*

Den größten Nutzen durch den Einsatz einer Kompensationsanlage hat man, wenn dadurch andere, meist wesentlich teurere Investitionen vermieden oder verbilligt werden können:

In der Firma aus Beispiel 1 ist wegen einer Produktionserweiterung die Erhöhung des Wirkleistungsbedarfs von 500 kW auf 700 kW geplant.

Bei gleichbleibendem unkompensierten  $\cos \varphi$  von 0,7 ergibt sich eine Scheinleistung von 1000 kVA, also eine Trafobelastung von 125%.

Für einen weiteren Trafo mit Ausbaurkosten wären ca. 30.000 € zu veranschlagen.

Mit dem Einbau einer Blindstromkompensation von 400kvar lässt sich die Scheinleistung auf unter 800kVA reduzieren und ein zusätzlicher Trafo vermeiden.

Der Investition von 30.000 € (Trafo) stehen also Kosten für die Kompensation von ca. 10.000 € gegenüber.

*Quelle: (1)*

## (5) Grundlagen der Planung von Kompensationsanlagen

Für die Projektierung bzw. Auslegung einer konventionellen Kompensationsanlage ist in der Regel die Kenntnis und Ermittlung folgender Parameter notwendig und ausreichend:

- Anlagenleistung zum Erreichen des gewünschten Leistungsfaktors
- Stufenleistung der Anlage
- Verdrosselungsgrad der Anlage (Filterkreisdrosseln)
- Spannungsfestigkeit der Kondensatoren
- Reaktionszeit der Anlage  
(Entscheidung für konventionelle oder dynamische Ausführung)

Außerdem ist in der Gesamtplanung auch die Auswahl der richtigen Stromwandler zu berücksichtigen. Hierzu mehr am Ende dieses Kapitels.

Die o.g. Parameter sollen im Folgenden definiert und näher erläutert werden, um auch dem Kunden, der nur gelegentlich mit der Problematik befasst ist, eine praxisgerechte Einarbeitung in das Thema zu ermöglichen.

Auf weitere Themen wie Mechanik und Kühlung soll hier nicht weiter eingegangen werden, da diese mehr den Anlagenhersteller betreffen.

## 5.1. Ermittlung der Anlagenleistung

Die notwendige Anlagenleistung ist grundsätzlich von dem durch die jeweiligen Lasten vorgegebenen vorhandenen Leistungsfaktor im Netz (ohne Kompensationsanlage) und dem gewünschten zu erreichenden Leistungsfaktor abhängig (zur Vereinfachung wird der Leistungsfaktor hier mit dem Ziel- $\cos \varphi$  gleichgesetzt).

Da der vorhandene IST-Wert in den meisten Anwendungsfällen durch zeitlich und leistungsmäßig wechselnde Lasten sehr differiert, wird eine Netzmessung empfohlen, durch welche die Mittel- und Maximalwerte der Wirk- und Blindleistungen sowie des Leistungsfaktors ermittelt werden können. Gleichzeitig können durch eine Messung auch die vorhandenen Harmonischen (Oberschwingungen) in Spannung und Strom ermittelt werden, die Aussagen über die Notwendigkeit einer Verdrosselung (s. Abschnitt 3) geben.

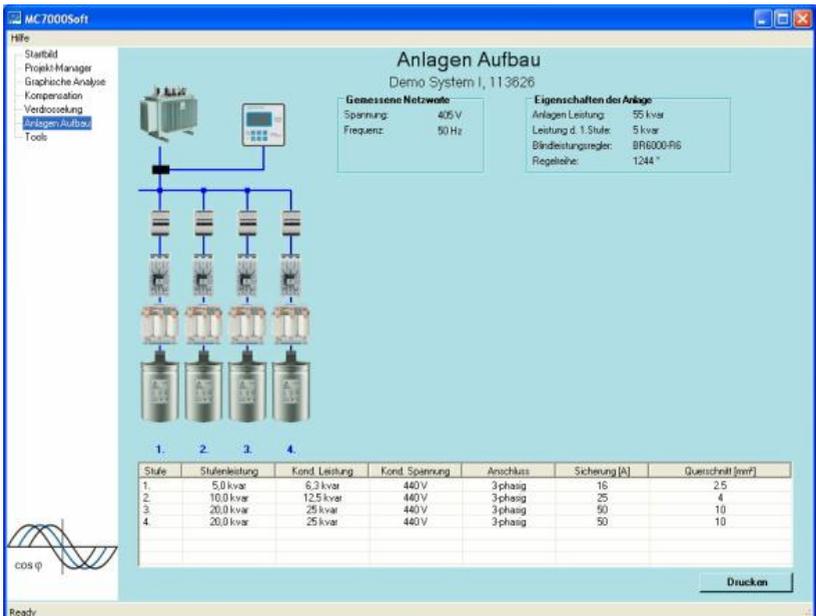
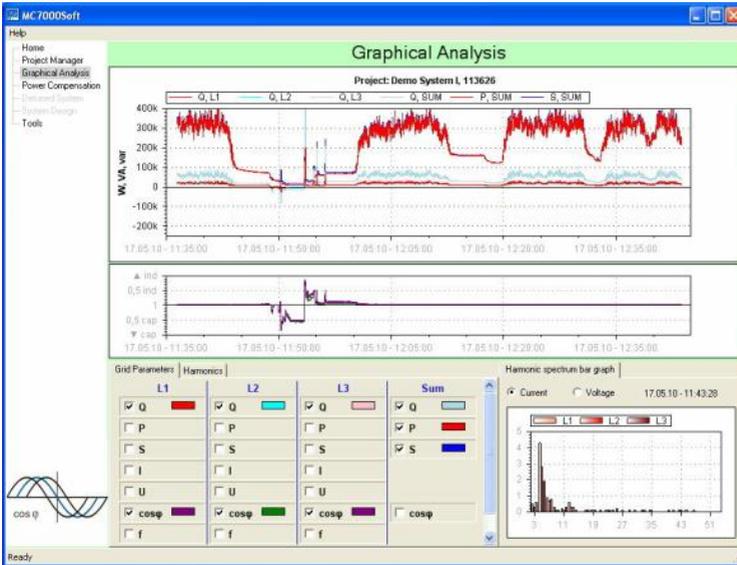
Netzmessungen sollten über einen Zeitraum von mindesten einer Woche erfolgen, um einen signifikanten Leistungsverlauf zu erhalten. Auf dem Markt sind eine Vielzahl entsprechender Messgeräte namhafter Hersteller erhältlich. Auch ein Ausleihen entsprechender Messtechnik oder die komplette Vergabe dieser Leistung an externe Anbieter wäre möglich.

Beispiel: MC7000

Messkoffer zur 3-phasigen Messung und Langzeitspeicherung elektr. Messwerte im Niederspannungsnetz. Eine komfortable Windows-Software erlaubt die schnelle und bequeme Auswertung der gemessenen Daten, insbesondere im Hinblick auf die Ermittlung der optimalen Auslegung einer Kompensationsanlage oder der Überprüfung einer bestehenden Anlage.



Die Software wurde speziell auf die Bestimmung der Größe und Auslegung von Kompensationsanlagen optimiert.



Ist eine Netzmessung nicht möglich, kann – bei Kenntnis oder empirischer Annahme der IST-Werte von Leistung und Arbeit – auch eine rechnerische Ermittlung der notwendigen Kompensationsleistung erfolgen.

Beispiel 1:

Die Bestimmung der notwendigen Kompensationsleistung (Anlagenleistung) erfolgt aus der EVU-Rechnung (Grundlage müssen typische Werte aus der Hauptbetriebszeit des Kunden sein)

Unsere Beispielwerte sind:

Wirkarbeit  $W_p = 200.000 \text{ kWh}$

Blindarbeit  $W_q = 160.000 \text{ kvarh}$

Wirkleistung (P):  $480 \text{ kW}$

(Wirkleistung der zu kompensierenden Last)

Die Kompensationsleistung ergibt sich aus

$$Q_c = P * (\tan \varphi_{\text{ist}} - \tan \varphi_{\text{soll}})$$

wobei

$$\tan \varphi_{\text{ist}} = \frac{W_q}{W_p} = \frac{160.000 \text{ kvarh}}{200.000 \text{ kWh}} = 0,8$$

Bei einem vom Netzbetreiber vorgeschriebenen  $\cos \varphi = 0,9$  (dies entspricht einem  $\tan \varphi$  von 0,484) wird die erforderliche Kompensationsleistung wie folgt berechnet:

$$Q_c = 480 \text{ kW} (0,8 - 0,484) = 152 \text{ kvar}$$

Die gewählte Anlagenleistung wäre 175 kvar (Standardgröße)

Um eine evtl. Erweiterung abzudecken wäre auch die Planung einer etwas größeren Anlage möglich.

Beispiel 2:

Ein Motor mit bekannten Daten soll auf einen Ziel  $\cos \varphi$  kompensiert werden.

Auch hier gilt wieder:  $Q_c = P * (\tan \varphi_{ist} - \tan \varphi_{soll})$

- $Q_c$  = notwendige kapazitive Leistung zum Erreichen des Ziel  $\cos \varphi$
- $P$  = bekannte Wirkleistung des Motors (in kW)
- Für den Term  $(\tan \varphi_{ist} - \tan \varphi_{soll})$  wird hier der Faktor  $F$  eingeführt, der aus nachfolgender Tabelle zu ermitteln ist.

- aktueller Ist  $\cos \Phi$  = 0,61
- gewünschter Ziel  $\cos \Phi$  = 0,96
- bekannte Motorleistung = 100 kW
- Faktor „F“ aus Tabelle = 1,01

Notwendige kapazitive Blindleistung zum Erreichen des gewünschten Ziel  $\cos \varphi$ :

$Q_c \text{ [kvar]} = P \text{ [kW]} \times F$   
 $Q_c \text{ [kvar]} = 100 \times 1,01$   
 $= 101,0 \text{ kvar}$

Ermittlung des Faktors „F“ für die Berechnung der notwendigen kapazitiven Blindleistung;

Hier kann anhand eines vorhandenen IST  $\cos \varphi$  und des geforderten SOLL  $\cos \varphi$  der Faktor  $F$  direkt abgelesen werden

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

Tabelle: Quelle (3)

### Die 3. Möglichkeit wäre eine Schätzung.

Diese gibt naturgemäß nur sehr grobe Anhaltswerte für die notwendige Kompensationsleistung und ist daher nur anzuwenden, wenn die anderen Methoden nicht möglich sind. Hier einige Erfahrungswerte für verschiedene Lasten:

Einzelkompensierter Motor:	35 ... 40% der Nennleistung
Einzelkompensierter Transformator:	ca. 2,5% der Trafonennleistung
Zentralkompensation:	35...50% der Trafonennleistung bei einem Ziel $\cos \varphi = 0,9$

Quelle: (1)

### 5.2 Ermittlung der Stufenleistung

Die Stufenleistung einer Kompensationsanlage – (kleinste mögliche Schaltleistung einer Stufe) – richtet sich ebenfalls nach dem jeweiligen Anwendungsfall. Sie sollte zwei (im Grunde widersprüchlichen) Forderungen möglichst gerecht werden:

- a) Feinstufige Regelung der Anlage:  
-> bedingt eine möglichst kleine Stufenleistung  
Einsatzfall: Auskompensation vieler kleiner wechselnder Lasten

#### Vorteile:

- genaue Ausregelung des Ziel-cos  $\varphi$
- gute Ausregelung auch kleiner Blindleistungsschwankungen

#### Nachteile:

- relativ hohe Schalzhäufigkeit
- dadurch höherer Verschleiß
- höherer Anlagenpreis durch zusätzliche kleine Stufen

- b) Schnelle Regelung bei möglichst wenig Schaltstufen:  
-> bedingt eine größere (grobe) Stufung  
Einsatz zur Kompensation weniger, größerer Verbraucher;  
Ziel-cos  $\varphi$  muß nicht exakt eingehalten werden;  
ökonomische Gründe

Vorteile:

- weniger Stufen
- geringere Anschaffungskosten
- niedrigere Schalthäufigkeit
- schnelles Ausregeln
- praxisgerecht

Nachteile:

- exakte Regelung auf Ziel-cos  $\varphi$  nicht möglich

Je nach Anwendungsfall sollte einem der beiden o.g. Fälle der Vorzug gegeben werden. (s. dazu auch Punkt 6: ökonomische Auswahlkriterien)

**Merke:**

In der Praxis beträgt die Stufenleistung der kleinsten Stufe in der Regel 10 ... 20% der Gesamtanlagenleistung.

### 5.3 Ermittlung des Verdrosselungsgrades / Einsatz von Filterkreisdrosseln



#### Problem:

In modernen Netzen werden zunehmend Oberschwingungserzeugende Lasten und Verbraucher betrieben. Hierzu gehören drehzahlgeregelte Antriebe, Gleichrichter, Thyristorsteuerungen, Leuchtstofflampen u.ä. Dadurch steigen Oberschwingungsbelastung und Klirrfaktor des Netzes. Durch die Oberschwingungen entsteht eine zusätzliche Blindleistungskomponente (Verzerrungsblindleistung)

Die in Kompensationsanlagen eingesetzten Kondensatoren bilden in Verbindung mit dem einspeisenden Transformator und den Netzinduktivitäten einen Schwingkreis. Dieser kann durch die Oberschwingungen angeregt werden und undefiniert in Resonanz geraten. Dadurch können die Harmonischen verstärkt werden, was im schlimmsten Fall zur Zerstörung der Kondensatoren führt.

#### Lösung:

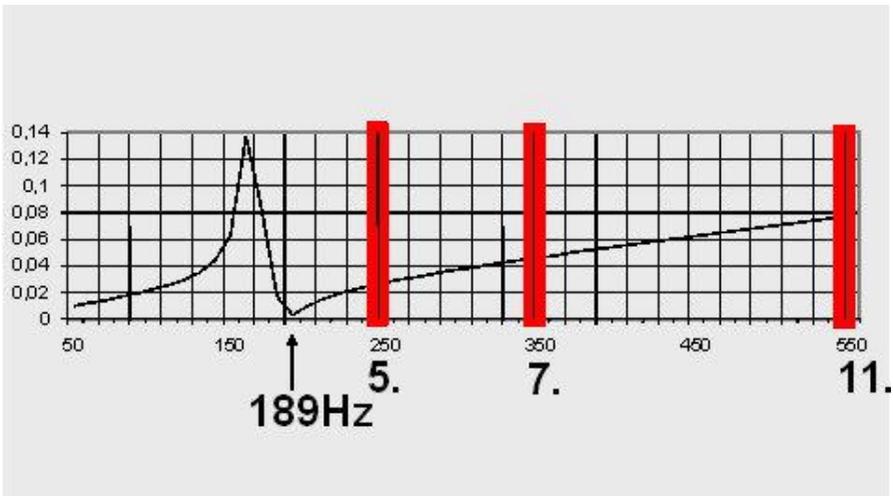
Filterkreisdrosseln werden in Kompensationsanlagen mit den Kondensatoren in Reihe geschaltet. Sie bilden mit den Kondensatoren einen sogenannten Serienschwingkreis. Die Resonanzfrequenz wird so abgestimmt, dass sie kleiner ist als die kleinste zu erwartende Oberschwingung in der Anlage.

Der Verdrosselungsfaktor  $p$  gibt das Verhältnis zwischen induktivem Blindwiderstand der Filterkreisdrossel und kapazitivem Blindwiderstand der Kondensatoren (induktive/kapazitive Reaktanz) an:

$$p = \frac{X_L}{X_C} \cdot 100\%$$



## Impedanz eines Netzes mit verdrosselter Kompensationsanlage 7%:



Gemäß der Definition des Verdrosselungsfaktors  $p=XI/Xc \cdot 100$  ergibt sich bei 7% Verdrosselung eine Resonanzfrequenz von 189Hz.

Damit liegt sie unterhalb der kleinsten zu erwartenden Oberschwingung in der Anlage. (im Allgemeinen ist dies die 5. Oberwelle – 250 Hz)

Im Diagramm sind die kritischen Harmonischen 5./ 7. und 11. farbig hervorgehoben.

Für alle Frequenzen oberhalb der Resonanzfrequenz (somit auch für die Oberschwingungen) wird die Reihenschaltung induktiv, somit wird die Möglichkeit einer Oberwellenresonanz zwischen Kompensationsanlage und Netzinduktivität ausgeschlossen.

Für den Verdrosselungsfaktor wurden Standardwerte definiert. (u.a. eingeführt, um bestehende Rundsteuerfrequenzen nicht zu stören)

Verdrosselungsfaktor	Resonanzfrequenz
5,67 %	210 Hz
7 %	189 Hz
14 %	134 Hz

Bei der Planung einer Kompensationsanlage ist unbedingt zu überprüfen, ob das zuständige EVU Rundsteuerfrequenzen zur Fernsteuerung verwendet. Wenn dies der Fall ist muß für eine verdrosselte Anlage die Resonanzfrequenz so gewählt werden, daß sie die Rundsteuerfrequenz nicht absaugt (Störabstand)

Die Resonanzfrequenz der Verdrosselung sollte unterhalb der Rundsteuerfrequenz liegen.

Eine andere Möglichkeit besteht darin verdrosselte Kondensatoren mit zusätzlichen Sperrkreisen für die Rundsteuerfrequenz zu versehen.

In der Praxis werden Filterkreisdrosseln von entsprechenden Anbietern bereits fertig berechnet in Standardgrößen angeboten. Die technischen Parameter für die Bestellung sind dabei Nennspannung, Verdrosselungsgrad sowie Größe (Leistung) des angeschlossenen Kondensators.

In der Tabelle sind einige gängige Standardgrößen aufgeführt. (Die Werte der einzelnen Spalten sind beliebig kombinierbar)

Vorzugsgrößen Netzspannung	Vorzugsgrößen Kondensator	Vorzugsgrößen Verdrosselungsgrad
400V / 50Hz	10kvar; 12,5kvar	5,67%
400V / 60Hz	20kvar, 25 kvar	7 %
440V / 50Hz	40kvar, 50kvar	14%
440V / 60Hz		

Unverdrosselte Kompensationsanlagen können aber auch überlastet werden, wenn keine Oberschwingungserzeuger im Verbrauchernetz installiert sind, jedoch ein Oberschwingungsvorbelastetes EVU-Netz existiert.

**Merke:** Darum sollten alle Kompensationsanlagen zum Schutz der Kondensatoren als verdrosselte Anlagen ausgeführt werden, wenn nicht eindeutig eine Oberwellenbelastung des Netzes ausgeschlossen werden kann. In Deutschland werden fast alle Neuanlagen als verdrosselte Anlagen ausgeliefert.

## 5.4 Spannungsfestigkeit der Kondensatoren

Für den Anlagenhersteller - aber auch für den Planer - ist in diesem Zusammenhang die Auswahl der Spannungsfestigkeit der eingesetzten Kondensatoren von Bedeutung, da durch die Serienschaltung der Drossel die Spannung über dem Kondensator angehoben wird.

Je nach Verdrosselungsgrad und Spannungsebene ergibt sich die in der Tabelle angegebene (Mindest-) Nennspannung der einzusetzenden Kondensatoren:

<b>Netzspannung</b>	<b>Verdrosselungsgrad</b>	<b>Notwendige Kondensator-Nennspannung</b>
400V / 50Hz	5,67%	440V
400V / 50Hz	7 %	440V
400V / 50Hz	14 %	480V
440V / 50Hz	5,67%	480V
440V / 50Hz	7 %	480V
440V / 50Hz	14 %	525V

Der Einsatz nicht genügend spannungsfester Kondensatoren in verdrosselten Anlagen stellt eine häufige Fehlerquelle dar und führt regelmäßig zur Überlastung der Kondensatoren und deren Ausfall.

Im schlimmsten Fall kann dies zur Zerstörung der Anlage führen.

(Explosion des Kondensators, falls die interne Abreißsicherung versagt)

Es gibt nun mehrere Wege, den geeigneten Kondensator zu ermitteln. Grundlage hierfür ist das Wissen, daß die konstante Größe des Kondensators seine Kapazität (in  $\mu\text{F}$ ) ist - und nicht die Leistung. Diese ist spannungsabhängig!

In folgendem Beispiel wird ein geeigneter Kondensator für eine 7% verdrosselte Kompensationsanlage mit einer Stufenleistung von 25kvar in einem Netz von 3x 400V gesucht.

Handelsübliche Leistungskondensatoren 25kvar mit einer Nennspannung von 400V sind durchaus verfügbar und wären für eine unverdrosselte Anlage auch geeignet. Für eine verdrosselte Anlage jedoch NICHT!

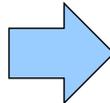
Gemäß Tabelle auf Seite 37 bewirkt der Verdrosselungsgrad von 7% eine Spannungserhöhung am Kondensator, die eine Nennspannung von 440V erfordert.

Theoretisch



25 kvar  
400V  
=  
3\*166 $\mu\text{F}$

Ermittlung tabellarisch  
über die Kapazität



Praktisch

30 kvar  
440V  
↑  
3\*166 $\mu\text{F}$



Der theoretisch korrekte Kondensator (25kvar/400V) besitzt eine Kapazität von 3x 166  $\mu\text{F}$ .

Benötigt wird daher ein Kondensator von 3x 166  $\mu\text{F}$ , jedoch mit einer Nennspannung von 440V.

Aus entsprechenden Kondensatortabellen der Hersteller ist nun leicht der richtige Typ herauszufinden: 166 $\mu\text{F}$  = 30kvar/440V (entspricht 25kvar/400V)

Es ist auch möglich die bekannte Leistung eines Kondensators bei einer angegebenen Spannung auf eine andere Spannungsebene umzurechnen. (Sinnvoll nur zum Umrechnen in niedrigeres Spannungsniveau, da eine höhere als die angegebene Nennspannung am Kondensator nicht erlaubt ist)

Die Formel

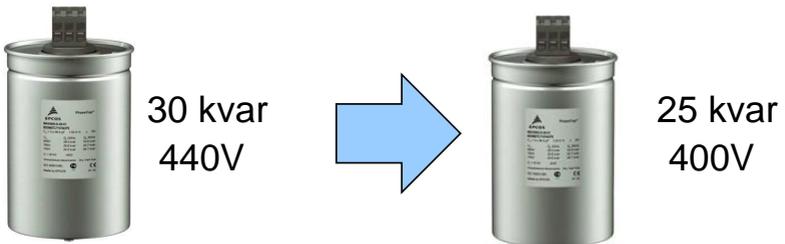
$$Q_{\text{New}} = \left( \frac{V_{\text{New}}}{V_C} \right)^2 \cdot \frac{f_{\text{New}}}{f_R} \cdot Q_C$$

ergibt die neue Leistung  $Q_{\text{new}}$  des Kondensators bei der neuen Spannung  $V_{\text{new}}$ , ausgehend von seiner Nennspannung  $V_C$  und seiner Leistung  $Q_C$ .

Gleichzeitig könnte auch die Leistung bei einer geänderten Frequenz ermittelt werden. Im Beispiel entfällt der Term der Frequenz, da diese sich nicht ändert (50Hz)

$$Q_{\text{New}} = \left( \frac{400}{440} \right)^2 \cdot 30\text{kvar} = 24,8\text{kvar}$$

Ausgehend vom Kondensator 30kvar/440V ergibt sich bei der neuen Spannung  $V_{\text{new}}$  von 400V eine Leistung von 24,8 kvar.



## 5.5 Reaktionszeit / Schaltzeit

### Konventionelle Kompensation:

Die Schaltzeit (Reaktionszeit) einer Kompensationsanlage kann mittels des Blindleistungsreglers in weiten Grenzen eingestellt werden. (1s -130 min.)

*Die minimale Wiederschaltzeit* ergibt sich (bei konventionellen schützgeschalteten Anlagen) aus der minimal zulässigen Wiedereinschaltzeit der Kondensatoren. Ein Wiederschalten des Kondensators (nach vorheriger Abschaltung) ist erst nach einer Entladung auf ca. 10% der Ladespannung zulässig. (Angaben der Kondensatorhersteller) Die hierfür notwendige Entladezeit ist abhängig von den verwendeten Entladewiderständen und liegt bei ca. 60 Sekunden. Dies ist auch die Werkseinstellung der Blindleistungsregler.

(Auf Sonderfälle mit Schnellentladedrosseln, die kürzere Entladezeiten ermöglichen, soll hier nicht eingegangen werden)

Die praktische Reaktionszeit einer Anlage kann kürzer sein, da mehrere gleichwertige Stufen im Wechsel geschaltet werden können.

Für den Sonderfall Mittelspannungskompensation kann die Schaltzeit auch auf mehrere Minuten programmiert werden.

Daraus ergibt sich, dass schützgeschaltete Kompensationsanlagen für normale praktische Anwendungen mit wechselnden Lasten, bei denen ein relativ langsames „Nachregeln“ des Ziel-cos  $\varphi$  im Minutenbereich ausreichend ist, gut geeignet sind.

### Dynamische Kompensation:

Schnelle Anwendungen verlangen auch schnelle Reaktions- und Schaltzeiten.

(Pressen, Schweißanlagen, Krananlagen, Aufzüge, Lifte, Windkraftanlagen sowie andere Verbraucher, die sehr schnell wechselnde Lasten aufweisen)

Es versteht sich von selbst, dass Anlagen mit Reaktionszeiten von > 30 Sekunden hier denkbar ungeeignet zum Kompensieren der Blindleistung sind - im schlechtesten Fall wird keine Stufe zuschalten.

Die Lösung für diese Fälle bieten dynamische Kompensationsanlagen, bei denen die Schaltschütze durch spezielle Thyristorschalter zum Schalten kapazitiver Lasten ersetzt werden.

Am Markt werden verschiedene Arten von Thyristorschaltern angeboten. Die Palette reicht von Leistungen von 10 kvar bis zu 200 kvar bei Nennspannungen bis 690V.

Thyristorschalter erhöhen die Lebensdauer der Anlage durch das verschleißfreie Schalten und ihre praktisch unbegrenzte Schalthäufigkeit. Durch das sanfte Zuschalten des Stromes im Nulldurchgang erhöht sich auch die Lebensdauer der Kondensatoren (keine Einschaltstoßströme)



10kvar/400V  
3-phasig

12,5kvar/400V  
einphasig



bis 50kvar/400V  
3-phasig

## 5.6 Ökonomische Planung von Kompensationsanlagen



Auch bei der Kompensation werden Investitionen nur dann getätigt wenn dies zur Funktion des Betriebes notwendig ist, Vorschriften eingehalten werden müssen oder dies einen finanziellen Vorteil bietet.

Für eine ökonomisch möglichst günstige Standard-Kompensationsanlage sollte daher beachtet werden, daß folgende Faktoren zu höheren Kosten führen, die nur sinnvoll sind, wenn in der Anwendung explizit gefordert:

### 1.) Wahl zu kleiner Stufen

In der Absicht eine besonders gute Regelung zu erreichen werden oft sehr kleine Stufen (im Verhältnis zur Gesamtleistung) ausgeschrieben. Sollten keine besonderen Gründe für extrem kleine Stufen vorliegen ist davon abzuraten. Energieversorger fordern meist einen Mindestwert des Verschiebungsfaktors ( $\cos\Phi$  0,9...1.0) bei dem keine Kosten anfallen. Dieser relativ große Bereich ist bei einem gewählten Ziel  $\cos\Phi$  von 0,95 auch mit wenigen (größeren) Stufen zu erreichen und einzuhalten. Jede zusätzliche Stufe erhöht den Preis der Anlage signifikant (die Kosten einer kleinen Stufe sind meist nur um den Preis des Kondensators geringer die als einer größeren) Zudem erhöht eine kleine Stufe die Schalalthäufigkeit und verringert die Lebensdauer der Schütze.

### 2.) Verdrosselung größer als 7%

Wenn die Oberschwingungsbelastung sehr hoch ist oder die Rundsteuerfrequenz des Netzbetreibers unter 250Hz liegt sind Verdrosselungen von 12,5% oder 14% notwendig.

Allerdings sind in diesen Anlagen die Drosselverluste höher und erhöhen die Verluste in der Kompensation. Die zusätzliche Erwärmung bedingt einen höheren Aufwand für die Kühlung oder sogar einen größerer Schrank. Bevor man also eine aufwendigere Drossel mit höheren Verlusten in einem teureren Schrank einsetzt sollte man prüfen ob dies immer notwendig ist.

### 3.) Mechanische Sonderbauformen

Man kann heute sicher Schaltschränke aller Farben und Formen beziehen, jedoch ist ein Standardschaltschrank immer noch die günstigste Lösung.

### 4.) Anforderungen an externe thermische Bedingungen

Eine Aufstellung der Kompensation in Räumen mit hoher Umgebungstemperatur erhöht den Aufwand für die Belüftung / Klimatisierung bzw. setzt die Leistungsdichte herab (weniger Leistung in einem Schrank). Bereits bei der Planung sollten die späteren Randbedingungen beachtet werden.

### 5.) Auslegung der Schutzart

Eine erhöhte Schutzart führt bei Kompensationsanlagen - im Gegensatz zu anderen Schaltschränken - zu erheblichen Mehrkosten. Wird die Schutzart von IP20 auf IP54 erhöht bedeutet dies erheblichen Mehraufwand für Kühlung und Wartung sowie eine Verringerung der Lebensdauer der Kondensatoren. Wenn eine hohe Schutzart von der Anwendung gefordert wird ist diese zu realisieren. Wenn sie vermieden werden kann spart dies Kosten.

## 5.7 Stromwandlerlösungen

Stromwandler gehören grundsätzlich nicht zum Lieferumfang einer Kompensation, sind für deren Betrieb jedoch zwingend notwendig und daher auch bei der Planung zu berücksichtigen.

Oft wird dieser Punkt vernachlässigt oder vergessen und die Realisierung dann dem Kunden oder der Installationsfirma überlassen.

Die Planung kann häufig nur vor Ort unter Berücksichtigung der Einbauverhältnisse geschehen.

Neben elektrischen Größen wie Stromwandlerübersetzungsverhältnis, Leistung und Genauigkeit ist die mechanische Bauform ein wichtiges Auswahlkriterium.

Dabei unterscheiden wir nach Montagemöglichkeit

### 1. Aufsteck-Stromwandler

Diese sind sehr preiswert, haben aber den Nachteil, daß der Hauptleiter für die Montage geöffnet werden muß. Dies bedeutet notwendigerweise eine Abschaltung der Anlage.

Die mechanische Auswahl erfolgt nach der Größe der Sammelschiene bzw. des Außendurchmessers des Kabels



### 2. Umbau-Stromwandler

sind teilbar und vermeiden damit die Auftrennung des Leiters zur Montage. Sie können einfacher montiert werden als Aufsteckwandler und können (zumindest bei Kabeln) meist ohne Abschaltung der Anlage installiert werden.

Auch hier sind Ausführungen für alle gängigen Sammelschienen bzw. Kabeldurchmesser verfügbar.

*Bildquelle: (4)*



### 3. Eine Sonderform stellen flexible Stromwandler dar.

Wie auf dem Bild erkennbar wird eine flexible Schleife (verschiedene Durchmesser verfügbar) um den zu messenden Leiter gelegt. Eine Auswahl nach Leiterdurchmesser ist hier meist nicht notwendig. Auch diese Schleife kann geöffnet werden. Damit ist ebenfalls eine schnelle nachträgliche Montage möglich.

Da die Schleife ein sehr geringes Nutzsignal erzeugt ist eine Elektronikeinheit als Verstärker zwingend notwendig.

*Bildquelle: (5)*



Die Lösung ist gut einzusetzen für kurzzeitige Messungen oder nachzurüstende Messungen an schwer zugänglichen Stellen. Ein großer Vorteil ist der weite Strommeßbereich (z.B. von 10 - 4000A) mit einem Gerät. Nachteilig ist der vergleichsweise hohe Preis.

---

Neben der mechanischen Bauform ist der Stromwandler natürlich entsprechend der zu erwartenden Stromstärke auszuwählen.

Für die elektrische Auswahl sind 3 Größen wichtig:

#### a) Stromwandlerübersetzungsverhältnis

(Verhältnis von Primär- zu Sekundär-Bemessungsstrom) als ungekürzter Bruch; z.B.: 1000/5A

Die Auswahl erfolgt entweder nach dem

- 1,1 fachen Wertes des Trafonennstromes
- nach Nennleistung der Verbraucher (Nennstrom x 1,2) oder
- Absicherung des zu messenden Abschnittes

Eine Überdimensionierung ist zu vermeiden, da die Messgenauigkeit bei kleinen Strömen sinkt. (Messfehler)

Eine Unterdimensionierung (Wandlerverhältnis zu klein gewählt) ist ebenfalls problematisch, da der Wandler bei Überlast in die Sättigung gerät, was ebenfalls zu Messfehlern bzw. zur Zerstörung führen kann.

Übliche Sekundärströme sind  $X / 5A$  oder  $X / 1A$

$X / 5A$ : höhere Genauigkeitsklasse möglich, jedoch auch höhere Verluste

$X / 1A$ : geringere Verluste, dadurch größere Leitungslängen möglich, ökonomischere Lösung, jedoch etwas geringere Genauigkeit

### b) Bemessungsleistung des Stromwandlers

Diese richtet sich nach der angeschlossenen Bürde, d.h. der Leistungsaufnahme des angeschlossenen Messgerätes im Strompfad sowie der verwendeten Leitungen. Hier spielt die Leitungslänge zum Messgerät eine große Rolle. Die Leitungen sollte so kurz wie möglich sein und einen Querschnitt von mindestens 2,5 qmm aufweisen.

#### Tabelle:

Wandlerleistung und mögliche Leitungslängen bei einem handelsüblichen Stromwandler von  $X/5A$  und einem Leitungsquerschnitt von 2,5qmm.

Bei einer Leistung von 5VA beträgt die maximale Leitungslänge 13m.

Achtung! Leitungslänge = wirkliche Länge hin und zurück. Entspricht nicht der Entfernung!

Zum Vergleich: Bei einem Wandler von  $X/1A$  gleicher Leistung wären es bereits 100m!

Klasse 0,5	Klasse 1
0,5VA / 0,7m	0,5VA / 0,7m
1VA / 2,1m	1VA / 2,1m
2,5VA / 6m	2,5VA / 6m
5VA / 13m	5VA / 13m
	10VA / 27m
	20VA / 55m

*Quelle: (6)*

Die Leistung des Wandlers sollte immer dem Meßgerät entsprechend dimensioniert sein.

### c) Die Genauigkeitsklasse.

Stromwandler werden entsprechend Ihrer Genauigkeit in Klassen eingeteilt. (z.B. 0,1 / 0,2 / 0,5 / 1 / 3)

Diese sind auf den Messwert bezogen. Werden Stromwandler mit einem in Bezug auf den Nennstrom geringen Strom betrieben, nimmt die Messgenauigkeit ab.

#### **Merke:**

Stromwandler sollten mindestens die Genauigkeitsklasse des angeschlossenen Messgerätes aufweisen und nicht überdimensioniert werden.

Stromwandler sind niemals im Leerlauf zu betreiben. (ohne Sekundärlast) Ist kein Meßgerät angeschlossen sind die Sekundärklemmen kurzzuschließen. Oft sind in den Anlagen bereits Kurzschlußklemmen vorgesehen. Bei der Inbetriebnahme oder nach Wartungsarbeiten wird das Öffnen dieser Klemmen gern vergessen. (Dies ist ebenfalls ein häufiger Fehler bei der Inbetriebnahme)

#### **Erdung:**

Nach VDE0414 sollen Stromwandler ab einer Reihenspannung von 3,6kV sekundär geerdet werden. Bei Niederspannung kann die Erdung entfallen, sofern die Wandler nicht großflächig berührbare Metallflächen besitzen. Gängige Praxis ist aber auch die Erdung von Niederspannungswandlern.

## (6) Wissenswertes über Blindleistungsregler

Blindleistungsregler gibt es seit den 1950er Jahren. Die ersten Geräte beruhen auf einer elektromechanischen Messung (Zählerscheibe). Zum Schalten der Kondensatoren wurden mechanische Quecksilberschalter verwendet.

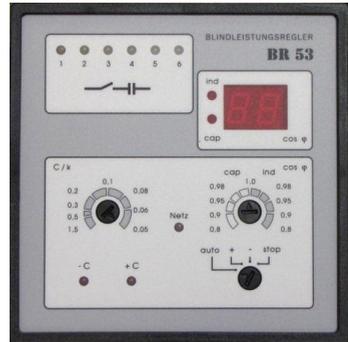
Die Zählscheibe wurde später durch Transistorschaltungen abgelöst. Die Ausgangsstufen wurden durch Glühlampen realisiert, auch eine Analoganzeige für den  $\cos \varphi$  war bereits vorhanden.



In den 1980er Jahren wurden die Geräte kleiner, die Verwendung von TTL Schaltkreisen auf Leiterplatten ermöglichte eine kompaktere Bauform.



Ende der 80er wurden dann auch die ersten Blindleistungsregler mit Mikroprozessoren ausgestattet.



2005:  
Moderne Blindleistungsregler besitzen eine komplexe mikroprozessorgestützte Steuerung, ein Klartextdisplay sowie eine kleine Tastatur zur möglichst intuitiven Bedienung.

Die Geräte fast aller Hersteller besitzen ein standardisiertes Einbaumaß 144x144 mm (für Fronttafeleinbau) und haben mittlerweile auch eine sehr geringe Einbautiefe (max. 60mm)



2014:  
Neben der Regelung der Blindleistung können moderne Geräte auch als 3-phasige Messgeräte verwendet werden. Sie ermitteln die Oberschwingungsbelastung im Netz, werten Grenzwerte aus und sind mit verschiedensten Schnittstellen ausgestattet.



### Anforderungen an moderne Blindleistungsregler:

Blindleistungsregler sollten heute universell für jede Kompensationsanlage verwendbar sein.

Bei der Planung ist lediglich die Reaktionszeit der Anlage zu berücksichtigen (konventionell oder dynamischer Blindleistungsregler), die Anzahl der notwendigen Schaltausgänge (Frage des Preises) sowie eventuell notwendige Optionen. (z.B. Schnittstellen)

Ansonsten sollten Regler zumindest folgende grundlegenden Eigenschaften besitzen:

- Programmierung der Größe und Anzahl der einzelnen Stufen
- Programmierung des Stromwandlerverhältnisses
- Übersichtliche Programmier- und Anzeigeoberfläche (möglichst Grafikdisplay mit Menüführung in Klartext)
- Vordefinierte Regelreihen; eigene Regelreihen möglich
- Intelligentes Regelverhalten:  
Schnelles Auskompensieren bei möglichst wenig Schaltspielen, Beachtung der Schaltspiele und Betriebszeit der Kondensatoren
- Anzeige diverser Netzparameter, Harmonische, Klirrfaktor usw.
- Temperaturmanagement
- 4-Quadrantenbetrieb (Funktion auch bei Generatorbetrieb)
- Speicherung von Maximalwerten und Schaltspielen bzw. –zeiten
- Fehlerspeicher, Störungs- und Alarmmeldungen

Als Optionen für spezielle Anwendungen sind zusätzliche Ein- und Ausgänge für Status- und Meldesignale oder zur Ansteuerung des Schaltschranklüfters hilfreich.

Ein oder mehrere Schnittstellen können notwendig sein für die Vernetzung von Geräten untereinander, zur Kopplung mehrerer Anlagen, für die Konfiguration der Geräte oder zur Ausgabe von Meßwerten.

Falls Wert auf die Ausgabe von Meßwerten gelegt wird ist eine interne Uhr sinnvoll, die alle Meßwerte mit einem Zeitstempel versehen kann.

Moderne Blindleistungsregler besitzen zudem die Möglichkeit eines Firmwareupdates.

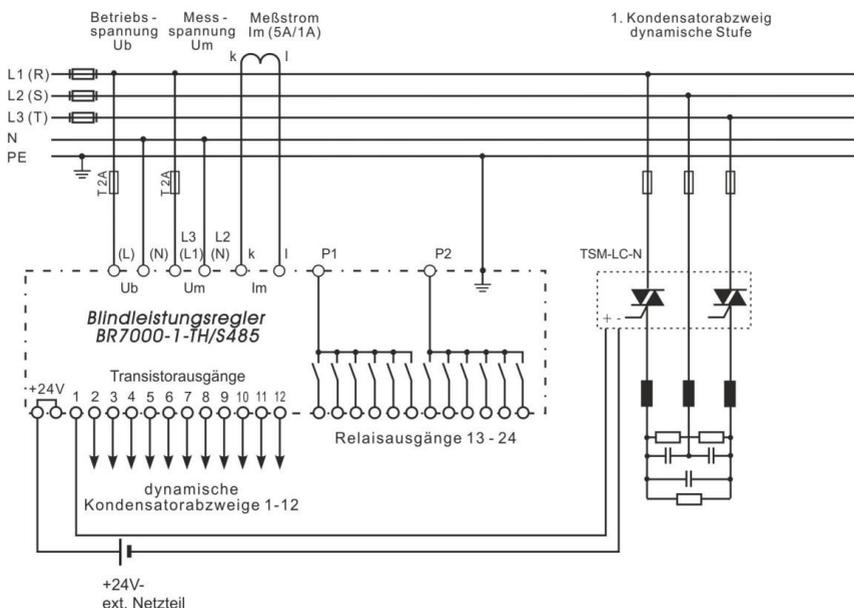
## (7) Spezielle Applikationen von Kompensationsanlagen

### 1. Gemischt-dynamische Anlagen (Hybridanlagen)

Diese kann man auch als 2 kombinierte Anlagen in einer betrachten: Eine Anlage mit konventionellen Stufen und eine weitere dynamische mit thyristorgeswitcheten Stufen.

Gemischt-dynamische Anlagen besitzen die Vorteile dynamischer Anlagen, können jedoch preiswerter angeboten werden.

Schnell wechselnde Lasten werden dynamisch kompensiert, Grundlast und langsam wechselnde Lasten werden konventionell kompensiert.



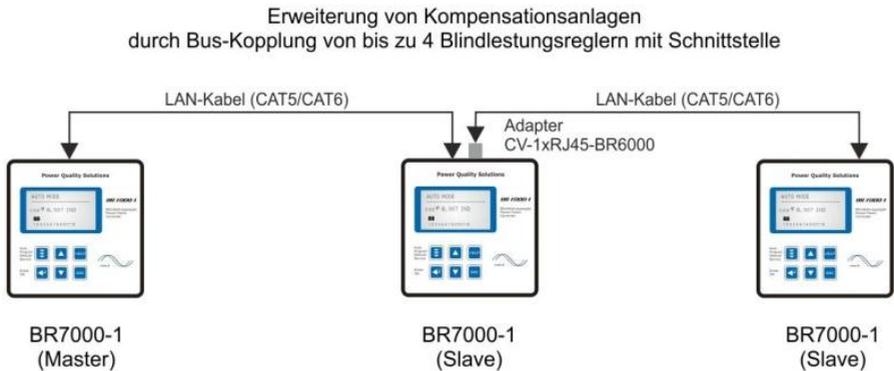
Der spezielle Hybridregler besitzt 12 Transistor- und 12 Relaisausgänge. Dynamische Stufen, die eine gewisse Zeit aktiv sind, werden vom Regler automatisch durch konventionelle Stufen ersetzt (umgeschaltet) so daß die dynamischen Stufen wieder für weitere Schaltungen frei werden.

## 2. Erweiterung von Kompensationsanlagen (Kaskadierung)

In großen Anlagen sind manchmal mehr als 12 Kondensatorausgänge notwendig.

Wie kann die Anzahl der Ausgangsstufen erweitert werden?

Die Kaskadierung oder Erweiterung von Kompensationsanlagen ist sehr einfach, wenn ein entsprechender Blindleistungsregler mit Schnittstelle eingesetzt wird. Mittels entsprechender Programmierung als Master mit ein oder mehreren Slaves können die Anlagen rückwirkungsfrei kaskadiert werden.



### 3. Kopplung von 2 Kompensationsanlagen

Häufig arbeiten 2 oder mehrere Anlagen an separaten Trafoeinspeisungen.

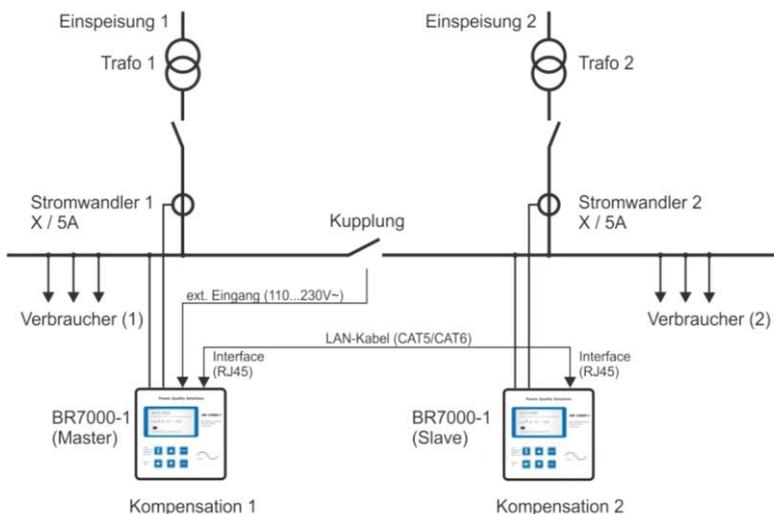
Oft existiert eine Kopplung zwischen den Systemen, die prozessbedingt offen oder geschlossen sein kann. In beiden Fällen sollen die Kompensationsanlagen rückwirkungsfrei schalten.

In der Vergangenheit wurden zur Lösung aufwendige Stromwandlerumschaltungen und Anpaßstromwandler benötigt, zudem beeinflussten sich die Regler trotzdem gegenseitig.

Moderne Systeme kommen ohne zusätzliche Stromwandler aus. Die Kopplung der Regler erfolgt über Ihre Schnittstelle.

Der Status des Kuppelschalters wird im Regler 1 eingelesen. Ist der Schalter geöffnet, arbeiten beide Anlagen separat und unabhängig voneinander.

Ist der Schalter geschlossen, arbeitet Regler 1 als Master und Regler 2 als Slave, d.h. beide Anlagen werden vom Master gesteuert.

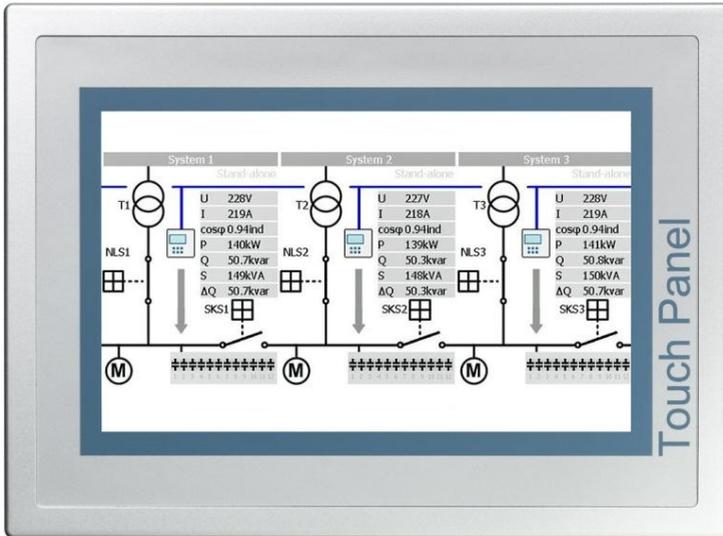


Die Vorteile der Lösung liegen auf der Hand:

- Es gibt keine unerwünschten gegenseitigen Beeinflussungen der Anlagen untereinander, da sie sozusagen als eine Anlage behandelt werden.
- Es sind keine zusätzlichen Stromwandler nötig.
- Die Installation ist sehr einfach (1:1 Bus Kopplung mit Patch-Kabel)

## 4. Kopplung mehrerer Anlagen

Sind mehr als 2 Anlagen miteinander zu koppeln ist dies allein mit den Reglern nicht mehr zu realisieren. In dieser Applikation übernimmt eine übergeordnete Steuerung die Koordination der über Netzwerk angeschlossenen Regler. Die Steuerung fungiert als Master, alle Regler als Slave. Die Steuerung ist hier durch ein Touchpad mit einer entsprechenden Firmware realisiert, welches gleichzeitig eine Visualisierung der aktuellen Betriebszustände ermöglicht.



Alle Betriebszustände sind möglich, d.h. alle Kombinationen aus den Schaltstellungen der Leistungsschalter und Kuppelschalter.

Auch hier wird eine gegenseitige Beeinflussung der Anlagen ausgeschlossen.

Ein weiterer Vorteil besteht in der Symmetrierung der Kompensationsleistung an der Sammelschiene, d.h. die benötigte Gesamtkompensationsleistung wird auf alle angeschlossenen Anlagen gleichmäßig aufgeteilt.

Durch den Einsatz handelsüblicher Patch-Kabel ist die Installation sehr einfach und Fehlerverdrahtungen sind praktisch ausgeschlossen. Die Parametrierung beschränkt sich auf wenige Werte.

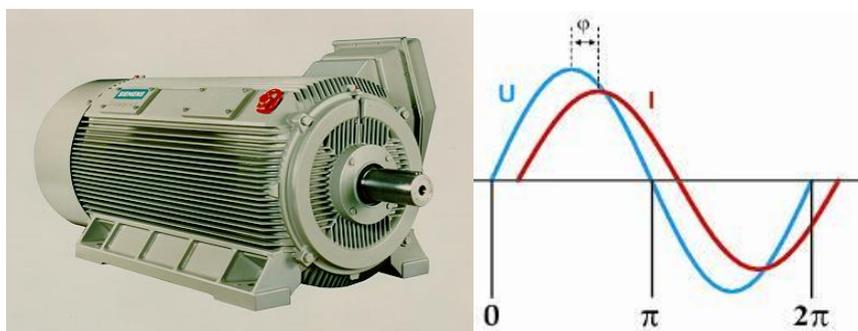
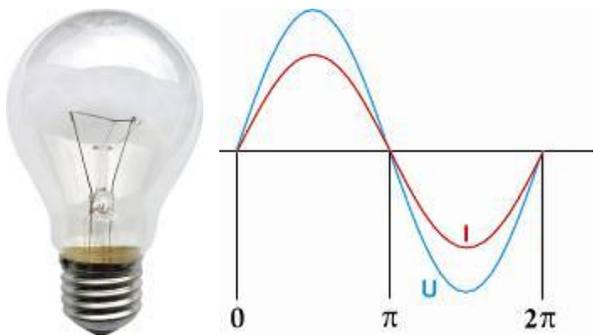
Mit dieser Lösung können maximal 5 Kompensationsanlagen gekoppelt werden.

## (8) Problem Oberschwingungen

Oberschwingungen spielen gegenwärtig und auch zukünftig eine große Rolle, da sie großen Einfluß auf die gesamte Problematik der Blindleistungskompensation haben.

Warum ist dieses Thema wichtig?

In der Vergangenheit hatten wir es größtenteils mit linearen Verbrauchern zu tun. Eine Last bezeichnet man als linear, wenn Strom- und Spannungskurven die gleiche Schwingungsform besitzen. Dieser Strom besitzt keine Oberschwingungskomponenten.



Beispiele: Glühlampen, Widerstände, elektr. Heizgeräte, induktive Verbraucher in gleich bleibenden Lastzuständen.  
(Motoren, Transformatoren usw.)

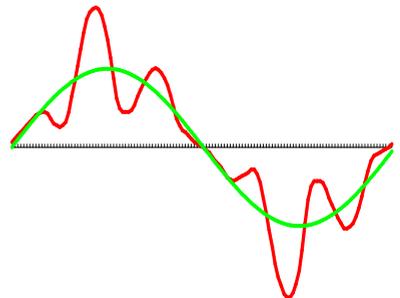
Heute gibt es aufgrund einer Vielzahl elektronischer Komponenten im Netz eine große Anzahl „nicht-linear“ Verbraucher. Eine Last wird als „nicht-linear“ bezeichnet, wenn Strom- und Spannungskurven nicht die gleiche Schwingungsform besitzen



Erzeuger sind z.B. Schaltnetzteile, Frequenzumrichter, aber auch Motoren während der Startphase, Transformatoren beim Einschalten usw.



Der Strom (hier rot) besitzt dann einen erhöhten Oberschwingungsanteil. Das Spektrum ist abhängig von der Verbraucherlast.



Wie werden die harmonischen Schwingungen definiert?

Die Grundschwingung ist eine Sinuskurve, mit der elektrische Spannung gleichmäßig zwischen positiver und negativer Polarität hin- und herwechselt; im Energieversorgungsnetz mit 50 oder 60 Hz.

Die Oberschwingung in einem Wechselstromsystem definiert sich als sinusförmige periodische Schwingung, deren Frequenz einem ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz entspricht, der sogenannten Ordnungszahl:

*Die Ordnungszahl definiert die Frequenz der Harmonischen (sie beträgt ein Vielfaches der Grundschwingung).*

*Beispiel :*

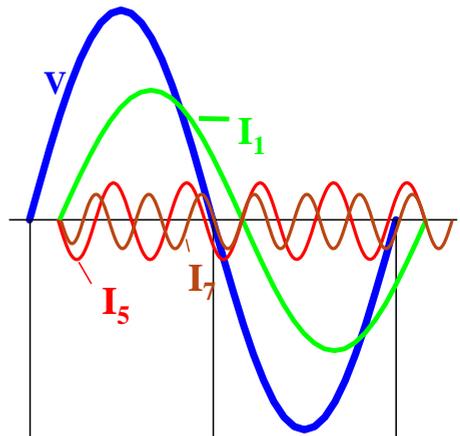
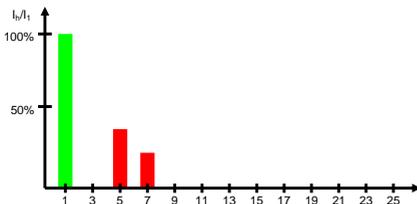
*Grundschwingung  $n_1 = 50$  Hz, die 5. Harmonische  $n_5$  besitzt eine Frequenz von  $f = 5 \times 50 = 250$  Hz.*

Der Oberschwingungsanteil kann sich nun aus einer Vielzahl von einzelnen Oberschwingungen zusammensetzen, die sich alle gegenseitig überlagern. Die geometrische Summe aller Oberschwingungen im Netz wird auch als Klirrfaktor bezeichnet.

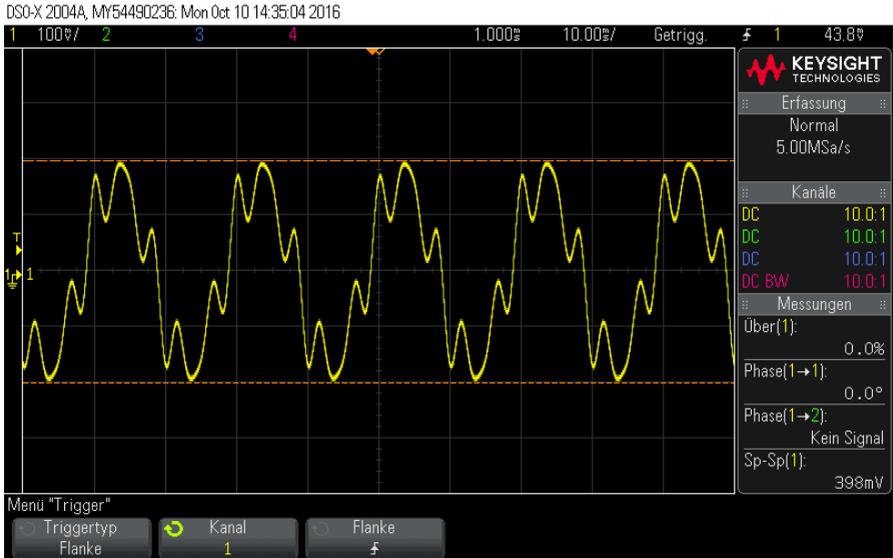
Hier ein einfaches Beispiel der Überlagerung der Grundschwingung 50Hz mit 30% einer 5. Harmonischen (250Hz) und 15% einer 7. Harmonischen (350Hz) - Prozent immer bezogen auf die Grundschwingung.

Links das Balkendiagramm als Übersicht;

Rechts die Grundwelle des Stromes (grün) und die daraus abgeleitete 5. bzw. 7. Oberwelle als geometrische Darstellung.



In der Praxis überlagern sich die Schwingungen; daher würde der Strom - mit einem Oszilloskop gemessen - dann so aussehen.

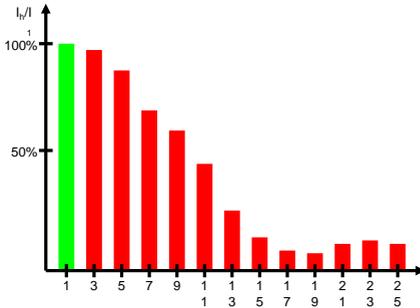


Man kann gut erkennen wie bereits 2 überlagerte Oberschwingungen die Sinusform verzerren.

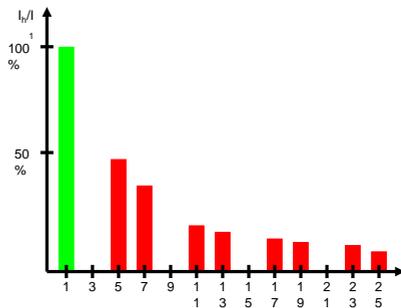
In Messgeräten wird dieses Frequenzgemisch durch Fourier - Transformation mathematisch wieder in seine Bestandteile (Spektrum) zerlegt, so dass eine verständliche prozentuale Anzeige der einzelnen Harmonischen erfolgen kann (meist in Balkenform oder auch prozentual) s. Balkendiagramm vorige bzw. nächste Seite

## Typische Frequenzspektren von Schaltnetzteilen und Frequenzumrichtern

Entsprechend komplex sehen dann die zugehörigen Frequenzgemische des Stromes aus.



Schaltnetzteil



Frequenzumrichter



### Probleme die durch Oberschwingungen verursacht werden:

- Überhitzung von Transformatoren, Drosselpulen  
Im Wirkwiderstand der Wicklungen verursachen Oberschwingungsströme zusätzliche Erwärmung (Kupferverluste). Diese Verluste sind quadratisch proportional dem Effektivwert des Laststromes.
- In Transformatoren und Drosselpulen mit Eisenkern verursachen Oberschwingungsströme zusätzliche Eisenverluste (Leerlaufverluste), bestehend aus Hysteres- und Wirbelstromverlusten. Hysteresverluste sind proportional der Frequenz, Wirbelstromverluste sind quadratisch proportional der Frequenz und der magnetischen Flussdichte.

- An den Impedanzen der Primär-/Sekundärspulen verursachen Oberschwingungsströme Spannungsabfälle, die sich der jeweiligen Grundschwingung überlagern und zu Verzerrungen führen können.
- Durch im Netz vorhandene Spannungsüberschwingungen werden in der Ständerwicklung von Motoren und Generatoren Ströme erzeugt, die zusätzliche Erwärmungen verursachen.
- Oberschwingungsspannungen in Synchronmaschinen können Pendel- und Rüttelmomente verursachen.
- Im Kabel verursachen Verbraucherströme Spannungsabfälle. Die dabei auftretenden Übertragungsverluste sind proportional dem Wirkwiderstand des Kabels und dem Quadrat des Effektivwertes des Stromes.
- Oberschwingungsströme der Ordnungszahl  $3n$ , die z. B. durch Wechselstromverbraucher mit Schaltnetzteilen erzeugt werden, addieren sich im 4 Leiter-Drehstromsystem arithmetisch im Neutralleiter (oder PEN-Leiter) Die Überlastung des Neutralleiters kann zu unzulässigen thermischen Beanspruchungen und zu unerwünschten magnetischen Feldern führen.
- Kondensatoren erzeugen selbst keine Oberschwingungen, sie können jedoch durch den zusätzlichen Stromfluss, der durch Oberschwingungsspannungen verursacht wird, thermisch überlastet werden und im Zusammenhang mit Induktivitäten zur Entstehung von Resonanzen beitragen.



## *Wie können diese Probleme vermindert oder gelöst werden?*

Eine Möglichkeit wäre bereits in der Planungsphase eine großzügige Auslegung von Transformatoren und Leitungen zur Reduzierung der Netzimpedanz. Dies dürfte jedoch oft an ökonomischen Hürden scheitern.

Desweiteren sollte – auch bereits in der Planungsphase – wenn möglich eine gleichmäßige Aufteilung von einphasigen Lasten auf die 3 Außenleiter erfolgen. Dies vermindert gerade bei Schaltnetzteilen in einphasigen Lasten (Bürogebäude) die übermäßige Erhöhung des OS-Stromes im Neutralleiter.

Auch die Verwendung von Umrichtern höherer Pulszahl (12-, 18 Puls Brückengleichrichter im Zwischenkreis) verschiebt das Frequenzspektrum nach oben.

Die genannten Maßnahmen sind jedoch nur in der Planungsphase sinnvoll realisierbar.

Zur Reduzierung in bestehenden Systemen sind Filterlösungen angezeigt.

Hier unterscheiden wir zwischen passiven Filtern

- verstimmte Filter, d.h. verdrosselte Kompensationsanlagen bzw.
- abgestimmte Filter, sogenannte Saugkreise

und aktiven Filtern.

## Passive Filter

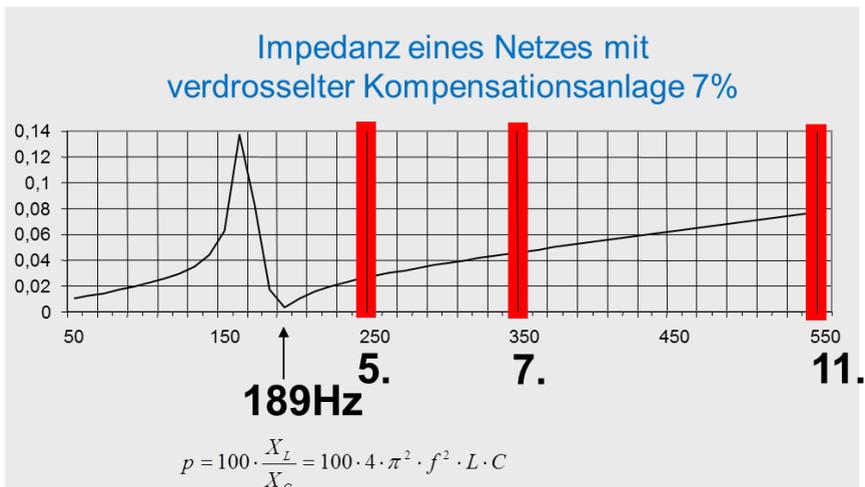
### a) verstimmte Filter

Typische passive Filterlösungen sind verdrosselte Kompensationsanlagen, welche auch als verstimmte Filter bezeichnet werden.

Die Vorteile wurden bereits benannt, als da sind:

- Verbesserung der Netzqualität durch Oberschwingungsreduktion
- Vermeidung von Resonanzen

Verdrosselte Kompensationsanlagen tragen somit nicht nur zum Schutz der eingesetzten Kondensatoren sondern auch zur Verbesserung der Netzqualität bei



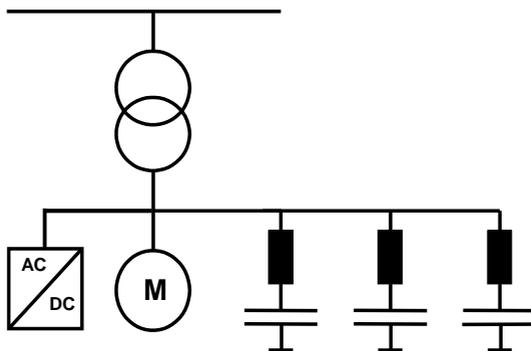
In diesem Zusammenhang hier noch einmal der Impedanzverlauf des Netzes mit einer 7% verdrosselten Kompensationsanlage. Die Resonanzfrequenz liegt bei 189Hz und damit unterhalb der niedrigsten zu erwartenden Oberschwingung von 250Hz.

Wichtig ist, daß die Resonanzfrequenz nicht in der Nähe der zu erwartenden Harmonischen oder eventueller Rundsteuerfrequenzen liegt. Vorteile sind niedrige Kosten, der einfache Aufbau sowie die robuste Lösung.

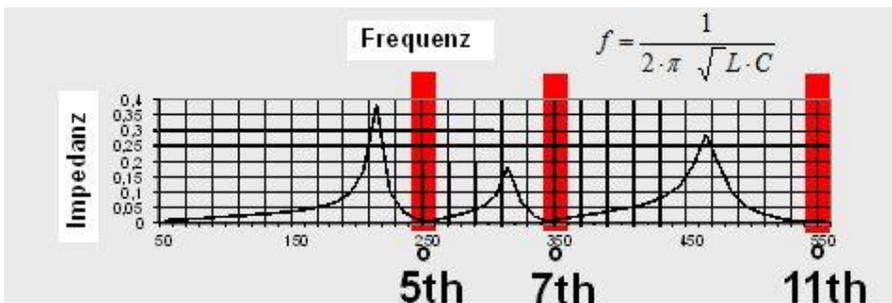
### b) abgestimmte Filter (Saugkreise)

Mit abgestimmten Filtern sollen bestimmte bekannte Frequenzanteile des Stromes im Netz möglichst vollständig absorbiert werden.

Die Saugkreise werden so berechnet, dass der Wechselspannungsanteil in einem bestimmten schmalbandigen Frequenzband abgeleitet und im Idealfall gegen Null gebracht wird. (minimale Netzimpedanz bei dieser Frequenz)



Durch Zuschalten verschiedener Filter in Abhängigkeit der Oberwellenlast können bestimmte Harmonische durch diese Saugkreise wirkungsvoll gedämpft werden.



Die Berechnung abgestimmter Filter ist nicht trivial und soll hier auch nicht weiter ausgeführt werden. Für die Berechnung sind möglichst genaue Kenntnisse der Netz- und Transformatorparameter erforderlich. Wir sehen hier eine Auswahl von Parametern, die für die Berechnung erforderlich sind.

- Transformatorleistung ( $S_n$ )
- Transformator-Kurzschlußspannung ( $u_k$  in %)
- Primär- und Sekundärspannung des Transformators ( $S_{sc}$ )
- Oberschwingungsmessung auf der NS Seite des Trafos (ohne Kompensation)
- Typ und Leistung überschwingungserzeugender Geräte (mit Oberschwingungsspektrum)
- Blindleistungsbedarf sowie vorhandene Kompensationsanlagen
- Single Line Diagramm
- Leistungsdaten angeschlossener Verbraucher
- usw.

Daher sollte die Auslegung abgestimmter Filter grundsätzlich erfahrenen Fachleuten auf diesem Gebiet anvertraut werden.

*Vorteile:*

- Effiziente Filterung der harmonischen OS –Ströme
- sehr gute Reduzierung der Oberschwingungen
- Geringere Kosten im Vergleich zu aktiven Filtern

*Nachteile:*

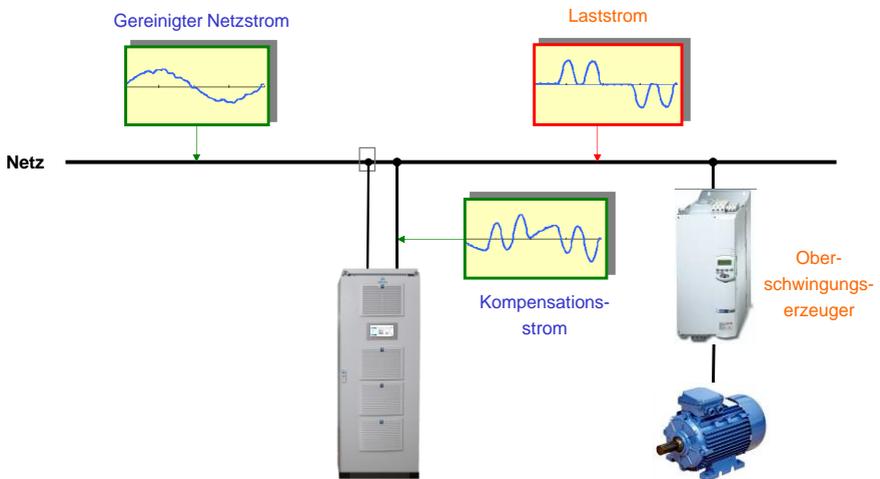
- Ein Filterkreis pro Frequenz erhöht die Komplexität bei Netzen, in welchen mehrere OS unterschiedlicher Ordnung gefiltert werden sollen
- Höherer Aufwand in der Berechnung und Ausarbeitung (Erfahrung!)
- Absaugung der Oberschwingungen aus dem Mittelspannungsnetz
- Probleme bei Netzen mit dynamischen Oberschwingungen
- Kondensatoren müssen für die hohen Belastungen ausgelegt sein

## Aktive Filter

Zur Verbesserung der Netzqualität, verbunden mit dynamischer Blindleistungskompensation können aktive Filter eingesetzt werden.

Die Idee des aktiven Filters besteht darin, den von Oberschwingungserzeugern "verseuchten" Laststrom durch aktives Aufprägen eines entsprechend berechneten Kompensationsstromes so zu beeinflussen, daß im Endeffekt ein bereinigter sinusförmiger Netzstrom zur Verfügung steht.

### Prinzip des Aktivfilters



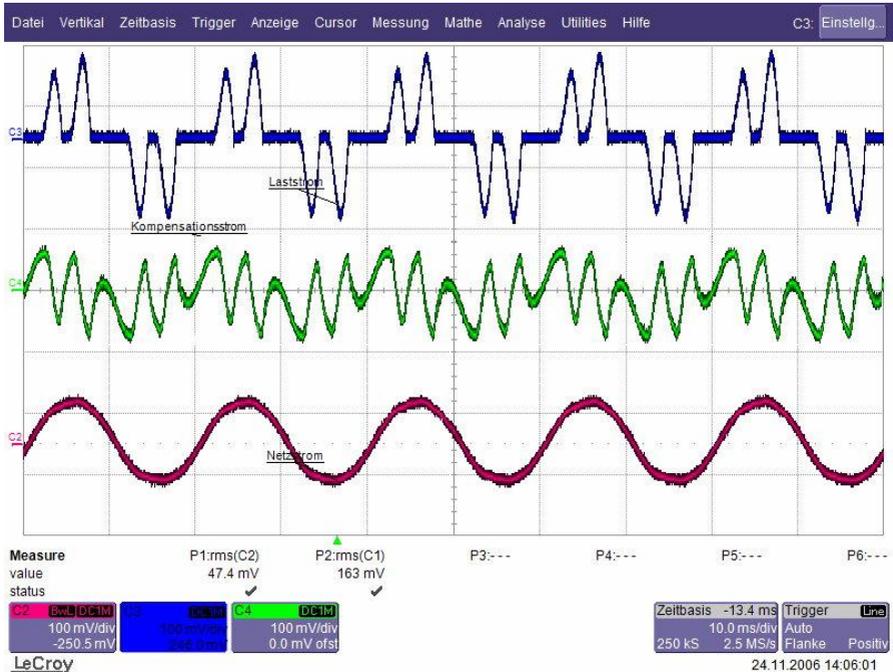
*Bildquelle: (7)*

Die Realisierung dieser Idee ist nicht trivial. Der Laststrom muß gemessen und in Echtzeit ausgewertet werden sowie ebenfalls in Echtzeit ein entsprechend gegenläufiger Strom berechnet, erzeugt und aufprägt werden.

Dieser Strom muß zudem in einer Leistung zur Verfügung stehen, die zur Kompensation der gesamten Oberschwingungslast ausreichend ist.

Aktive Filter sind daher - zumindest derzeit - eine ökonomisch aufwendige Lösung.

## Funktionsprinzip:



Bildquelle: (7)

Wir sehen oben (blau) den von verschiedenen Oberschwingungserzeugern versuchten Netzstrom. Dieser hat mit der normalen 50Hz Sinusform nicht mehr viel gemeinsam.

Aus diesem Strom wird unter Abzug der 50Hz Komponente ein entsprechender Gegenstrom (Kompensationsstrom) berechnet (hier grün) Kompensation bezieht sich hier auf die gesamte Kompensation des Oberwellenspektrums und nicht nur auf die Blindleistungskompensation. Die Blindleistung wird jedoch im Rahmen der zur Verfügung stehenden Leistung mit kompensiert. Dies geschieht - wie alles beim Aktivfilter dynamisch, d.h. in Echtzeit.

Der berechnete Kompensationsstrom wird nun mit der entsprechenden Leistung vom Aktivfilter zusätzlich eingespeist. Aus der Addition der Ströme ergibt sich der resultierende Netzstrom - idealerweise wieder ein Sinus. (rot)

## Beispiel: Aktive Harmonicfilter (AHF) PQSine von TDK / EPCOS

Dieses System besteht aus einer Steuereinheit sowie den Leistungsbaugruppen, die modular aufgebaut sind. Pro Leistungsmodul können bis 60A Kompensationsstrom generiert werden. Maximal sind 5 Module im Schrank installierbar, was eine maximale Schrankleistung von 300A ergibt.

*Filterung der OS  
bis 50. Ordnung*

*Phasensymmetrierung  
bei ungleicher  
Lastverteilung*

*Dynamische Blind-  
leistungskompensation*

*Überlastschutz*

*Reaktionszeit: 21  $\mu$ s  
Ausregelzeit: <300 $\mu$ s*



*Bildquelle: (7)*

Gesteuert wird das komplette Filter mittels einem Controldisplay, welches eine Visualisierung der Programmierung und des Betriebszustandes gestattet und die OS-belastung des Netzes in Echtzeit darstellt. Wie alle modernen Aktivfilter arbeitet auch diese Steuerung mit schnellen Signalprozessoren, besitzt diverse Schnittstellen und ist für 3- bzw. 4-Leiternetze ausgelegt.

Zusammenfassend können Aktivfilter als High-End Lösung für die Verbesserung der Netzqualität in überschwingungsverseuchten Netzen bezeichnet werden. Neben der sehr guten Reduzierung der Oberschwingungen können sowohl symmetrische als auch unsymmetrische Lasten in Echtzeit kompensiert werden.

Die Auswahl der Filter ist einfach und beschränkt sich auf die Leistungsgröße (möglicher einspeisbarer Strom) sowie die Auswahl der Netztopologie in Abhängigkeit der überschwingungserzeugenden Verbraucher (3- oder 4-Leiter Netz)

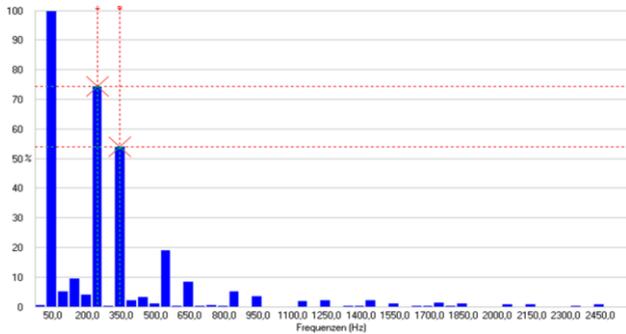
Umfangreiche Netzstudien sowie Berechnungen entfallen, so daß Aktivfilter bereits vor der Realisierung eines Projektes relativ einfach zu planen sind.

Der einzige gravierende Nachteil liegt in den derzeit hohen Anschaffungskosten derartiger Systeme.

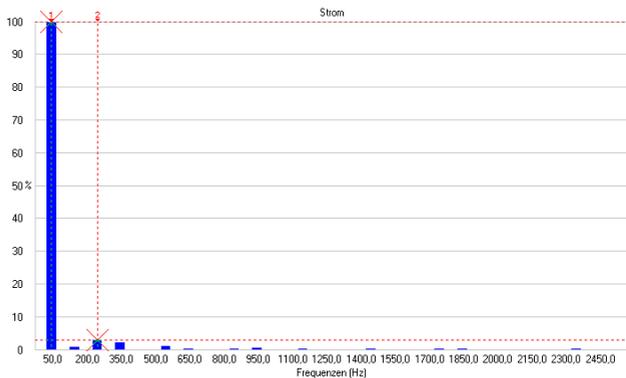
Praxisbeispiel 1:

Umrichterapplikation eines Frequenzumrichters 45kW mit 30kW Last.

ohne Aktivfilter:  
THD-I = 95%



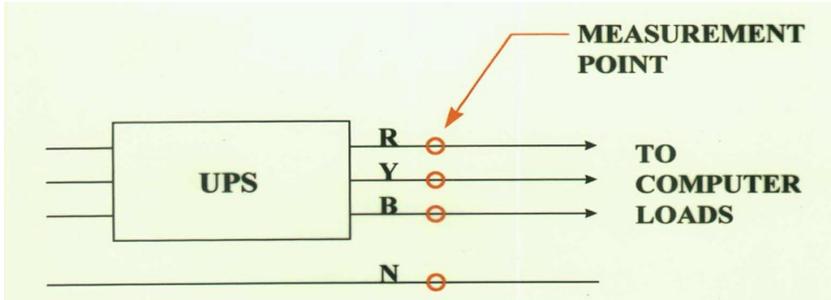
mit Aktivfilter:  
THD-I = 3,9%



Mit Filter konnte der Klirrfaktor THD-I auf unter 5% gesenkt werden. Alle Oberschwingungen wurden wirkungsvoll eliminiert wie die Messung eindrucksvoll demonstriert.

Praxisbeispiel 2:

Messungen in einem Gebäude mit hoher Computerlast.



Das typische Problem sind hierbei hohe Ströme der 3. Oberschwingung in den 3 Phasen sowie dem Neutralleiter, verursacht durch die vielen einphasige Lasten. (typisch für Bürogebäude bzw. Computerlasten) Durch Einsatz eines Aktivfilters konnte auch hier die Oberwellenlast enorm gesenkt sowie gleichzeitig der Neutralleiter entlastet werden.

	Ohne AHF		Mit AHF
	50Hz Strom	150Hz Strom	150Hz Strom
Phase 1	68A	42A	1.9A
Phase 2	66A	40A	1.8A
Phase 3	67A	40A	4.8A
Neutralleiter	2A	121A	5.5A

Quelle: (7)

## Trends und Zusammenfassung

Filterlösungen (ob passiv oder aktiv) werden in heutigen Netzen und auch bei der Planung von neuen Projekten immer wichtiger.

Die Komplexität heutiger Energienetze nimmt rasant zu, durch den Einsatz von immer mehr nichtlinearen Verbrauchern wird die Netzqualität schlechter. Als Antwort darauf werden immer mehr aktive Filterlösungen eingesetzt.

Da aktive Filter jedoch hohe Investitionskosten verursachen sollte auch über den Einsatz von Hybridlösungen nachgedacht werden. (Optimale Kosten / Nutzen Balance)

Inhalt:

Zusammenfassung des Workshops  
„Entstehung und Kompensation von Blindleistung“  
beim „Planerforum 2016“  
Phoenix Contact Deutschland GmbH  
am 09.11.2016

Referent: Michael Nehring  
EBEHAKO electronic GmbH  
Ziegelstraße 1a  
08112 Wilkau Haßlau  
Tel.: 0375 671230  
Fax: 0375 671003

e-mail: [mail@ebhako-electronic.de](mailto:mail@ebhako-electronic.de)  
URL: [www.ebhako-electronic.de](http://www.ebhako-electronic.de)  
[www.blindleistungsregler.de](http://www.blindleistungsregler.de)

Revision: 08/2021

## Quellenverzeichnis:

- (1) Große-Gehling/ Just/ Reese/ Schlabbach:  
Blindleistungskompensation - Systemdienstleistung – Netzqualität  
2. Auflage; 2013
- (2) ESKAP GmbH, Nürnberg
- (3) TDK / EPCOS Product Profile 2018
- (4) MBS AG, Sulzbach: Produktkatalog
- (5) Janitza electronics GmbH:  
Broschüre „Rogowski-Stromwandler& Messumformer“ (09/2017)
- (6) Janitza electronics GmbH: Auswahl von Stromwandlern
- (7) TDK/ EPCOS

nicht bezeichnete Fotos und Abbildungen:  
EBEHAKE electronic GmbH sowie  
fotolia - Lizenz