

Whitepaper

## Kompensation von Blindleistung

# KOMPENSATION VON BLINDLEISTUNG

Die Entstehung und die negativen Folgen von Blindleistung, die Arten der Kompensation sowie Installation und Wartung moderner Kompensationsanlagen



# Kompensation von Blindleistung

Oft tauchen in der Praxis Fragen in Bezug auf die Blindleistungskompensation in den gewerblichen und industriellen Stromnetzen auf. Dieser Fachbericht setzt den Fokus auf die Entstehung und die negativen Folgen von Blindleistung, die Arten der Kompensation sowie Installation und Wartung moderner Kompensationsanlagen.

Techniker verstehen unter dem Begriff Kompensation, dass verschiedene Größen gegeneinander wirken und sich möglichst aufheben. Ziel ist es, einer störenden physikalischen Größe durch entgegenstellen einer Zweiten, deren unerwünschten Effekt aufzuheben. In unserem Bericht wollen wir die induktive durch eine kapazitive Blindleistung kompensieren.

## Entstehung von Blindleistung

Die für Licht, Wärme oder Bewegung benötigte elektrische Energie wird erzeugt durch Kraftwerke oder dezentrale Erzeuger, welche in Abhängigkeit des Verbrauchers ihre Einspeisung regeln. Teilweise entnehmen Verbraucher dem Energieversorgungsnetz induktive Blindleistung, die für die Erzeugung eines Magnetfeldes benötigt wird. Typische induktive Verbraucher sind Motoren und Transformatoren.

So setzen Elektromotoren nur ca. 60% der abgenommenen elektrischen Energie in mechanische Leistung um und das natürlich mit den entsprechenden negativen Auswirkungen durch Blindleistung auf dem Versorgungsnetz.

Der Energieversorger verrechnet die aufgenommene Wirkleistung, die sich aus dem Produkt von Spannung, Strom und  $\cos \varphi$  ergibt, als elektrische Wirkarbeit  $W$ , also einer bestimmten Leistung  $P$  über eine

bestimmte Zeit  $t$  in Kilowattstunden (kWh). Anders verhält es sich mit der Blindleistung. Diese pendelt zwischen Erzeuger und Verbraucher und wird in diesem Sinne nicht »verbraucht« (Bild 1).

## Berechnung der Blindarbeit

Das Maß der Belastung von Netztransformatoren, Freileitungen und Kraftwerken wird als Scheinleistung  $S$  ausgedrückt. Diese errechnet sich aus der schon angesprochenen Wirkleistung  $P$  und der Blindleistung  $Q$ .

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

Anhand der Formel erkennt man die zusätzliche Belastung der Übertragungseinrichtungen des Netzbetreibers durch die Blindleistung. Um die stromabhängigen Verluste gering zu halten und einen ökonomischen Energietransport zu gewährleisten, schreiben die Netzbetreiber einen minimalen Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  vor. Dieser beschreibt das Verhältnis von Wirk- zu Scheinleistung und ist einheitenlos. Durch Umrechnung erhält man den Phasenverschiebungswinkel  $\varphi$ .

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

In den Energiezählern für Gewerbe- und Industriebetriebe wird außer der Wirkarbeit auch die induktive Blindarbeit gemessen und laut Stromliefer-

ungsvertrag verrechnet. Die Firmen dürfen für gewöhnlich die Hälfte der bezogenen Wirkarbeit im Abrechnungszeitraum als Blindarbeit dem Energieversorgungsnetz kostenfrei entnehmen. Das entspricht einem durchschnittlichem  $\cos \varphi$  von 0,9. Der Kunde (Endverbraucher) muss die aus dem Netz entnommene Blindarbeit, welche über die Freigrenze hinausgeht, bezahlen.

## Reduzierung der Stromaufnahme

Die Hauptaufgabe einer Kompensation besteht also darin, die Blindarbeitskosten, die der Energieversorger verrechnet, auf »Null« zu senken. Ein zusätzlicher Grund ist die Stromentlastung durch die Blindleistungskompensation. Sehen wir uns die Formel für die Wirkleistung an:

$$P = U \times I \times \cos \varphi \times \sqrt{3}$$

Stellt man die Formel nach dem Strom  $I$  um, ergibt sich:

$$I = \frac{P}{U \times \cos \varphi \times \sqrt{3}}$$

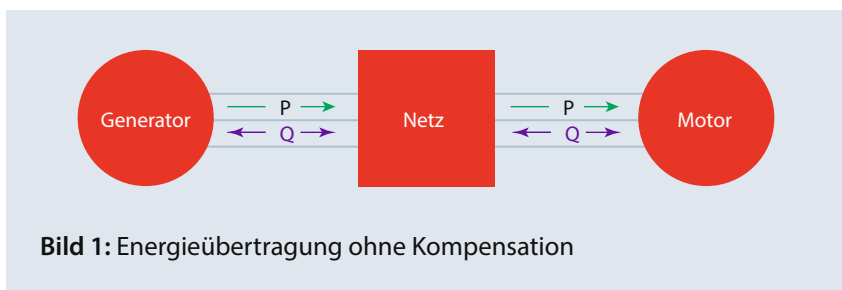
Der Strom ist also abhängig vom Leistungsfaktor  $\cos \varphi$ . Hierzu ein Beispiel:

An einem NH-Abgang zu einer Unterverteilung mit 250 A, soll ein weiterer Verbraucher mit einer Stromaufnahme von 35 A angeschlossen werden. Folgende Messwerte liegen vor:  $U = 400 \text{ V}$ ,  $I = 238 \text{ A}$ ,  $\cos \varphi = 0,72$

$$\begin{aligned} P &= U \times I \times \cos \varphi \times \sqrt{3} \\ P &= 400 \text{ V} \times 238 \text{ A} \times 0,72 \times \sqrt{3} \\ P &= 118700 \text{ W} \end{aligned}$$

Erhöht man durch eine Kompensation den Leistungsfaktor auf  $\cos \varphi 0,97$ , reduziert sich der Strom von 238 A auf:

$$\begin{aligned} I &= \frac{P}{U \times \cos \varphi \times \sqrt{3}} \\ I &= \frac{118700 \text{ W}}{400 \text{ V} \times 0,97 \times \sqrt{3}} = 176 \text{ A} \end{aligned}$$



Die Stromaufnahme verringerte sich durch die Kompensation (**Bild 2**) der Blindleistung um 62 A, was einer Reduktion von 26 % entspricht! Jetzt besteht noch genügend Spielraum, um den benötigten Verbraucher mit 35 A anzuschließen.

### CO<sub>2</sub>-Reduzierung durch Blindleistungskompensation

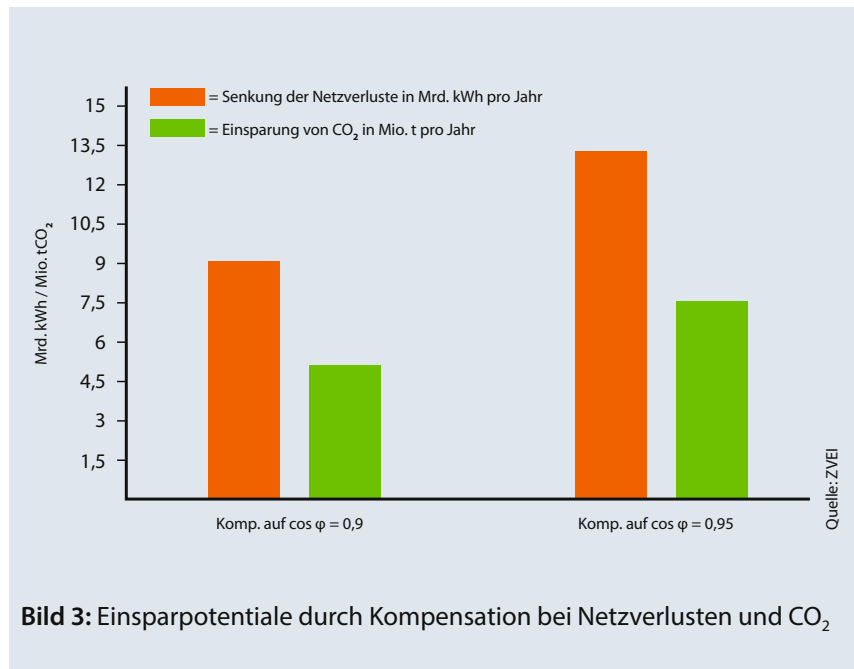
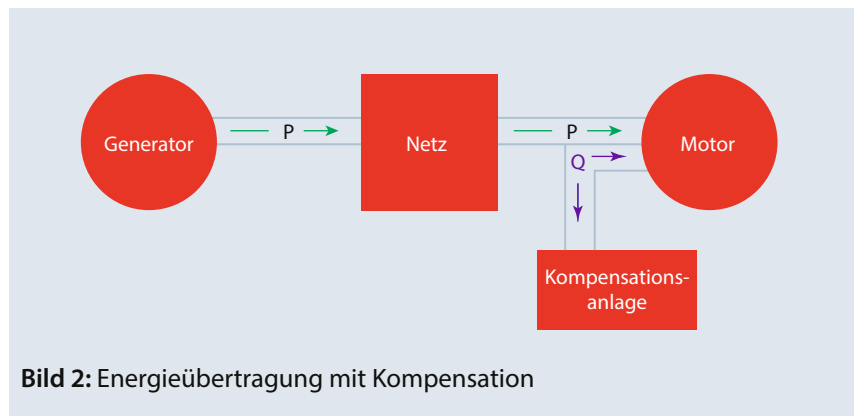
Die Reduzierung von Netzverlusten durch Einsatz von Blindleistungskompensationsanlagen trägt zu einem signifikanten Schutz der Umwelt bei. Standard ist in Deutschland eine Teilkompensation mit einem Leistungsfaktor  $\cos \varphi$  von mindestens 0,9. Das bewirkt eine jährliche Senkung der Netzverluste um ca. neun Milliarden Kilowattstunden. Dies entspricht der Stromerzeugung von ca. sechs Kohlekraftwerken und somit einer CO<sub>2</sub>-Emissions-Reduzierung von etwa 5 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub> jährlich. Kompensiert man den kompletten Blindleistungsbedarf mit einem verbesserten Leistungsfaktor von 0,95 (=  $\cos \varphi$ ), reduzieren sich die Netzverluste um weitere 4,3 Milliarden Kilowattstunden. Zusätzlich ließen sich weitere 2,5 Millionen Tonnen des schädlichen Umweltgifts CO<sub>2</sub> einsparen (**Bild 3**).

### Verbesserung der Netzqualität

Die Verbesserung der Netzqualität ist ein weiterer Pluspunkt der Blindleistungskompensation. In modernen Industrieanlagen ist heute der Einsatz von Leistungselektronik (z. B. Frequenzumrichter) im Sinne von energieeffizienten Maßnahmen sehr gefragt.

Diese Geräte besitzen allerdings keine sinusförmige Stromaufnahme mehr. Dadurch werden Netzrückwirkungen in Form von Oberschwingungsspannungen erzeugt.

Dies verursacht Störungen an Verbrauchern, die am gleichen Netz angeschlossen sind. Durch die Installation einer Kompensationsanlage als abgestimmte Saugkreisanlage (Reihenschaltung eines Kondensators und einer Induktivität), lässt sich der Spannungspegel der Oberschwingungen reduzieren und somit



die Störungen an den Verbrauchern beseitigen.

Eine Saugkreisanlage ist von ihrem Grundsatz her eine verdrosselte Blindleistungskompensation, in der die Resonanzfrequenz nahe an die störende Oberschwingungsfrequenz gelegt wird. Sie hat den Vorteil, dass sich speziell ausgewählte niederfrequente Oberschwingungen im Netz reduzieren lassen. Außerdem bleibt auch die Tonfrequenz-Rundsteuerung im Verteilungsnetz ungestört.

Allerdings ist hier eine Überwachung der Anlagen erforderlich. Die Gründe dafür sind Alterung von Bauteilen und die bereits angesprochene steigende Anzahl von Oberschwingungsanteilen, die die Gefahr einer Überlastung der Anlage in sich bergen.

Ein weiterer Einsatzbereich von Kompensationsanlagen ergibt sich bei re-

generativen Energieerzeugern, wie zum Beispiel Solar- oder Windkraftanlagen.

Laut Gesetz müssen diese Energieerzeugungsanlagen, die in das öffentliche Energienetz einspeisen und eine Leistung von mehr als 100 kW haben, zur Konstanthaltung der Spannung beitragen.

Sinkt die Netzspannung, kann durch Zuschalten von Kondensatoren die Spannung angehoben werden. Man unterscheidet dabei zwischen Mittel- und Niederspannungsanlagen.

Die Kompensation auf der Niederspannungsseite erfolgt nach einer Blind- und Wirkleistungskennlinie (Q/P-Kennlinie) und auf der Mittelspannungsseite nach einer Blindleistungs-Spannungs-Kennlinie (Q/U-Kennlinie).

## Kompensation von Blindleistung

Im zweiten Kapitel geht es vor allem um die verschiedenen Kompensationsarten und die Berechnung und Festlegung eines geeigneten Wertes des Kompensationskondensators.

Nachdem wir den vielfältigen Nutzen einer Kompensation erläutert haben, betrachten wir jetzt die verschiedenen Möglichkeiten, die uns zur Kompensation von Blindleistung zur Verfügung stehen. Je nach Größe des Industriebetriebes werden unterschiedliche Arten von Kompensationsanlagen eingebaut.

### Kompensationsarten

Prinzipiell unterscheidet man drei Arten der Kompensation:

- Einzelkompensation
- Gruppenkompensation
- Zentralkompensation

Bei der Einzelkompensation (**Bild 4**) wird ein Kondensator an einen Verbraucher angeschlossen. Der Vorteil liegt in der Entlastung der Leitungen von der Hauptverteilung bis zum Endverbraucher. Diese Variante ist jedoch nur bei großen Leistungen rentabel.

Die Gruppenkompensation (**Bild 5**) setzt man dann ein, wenn mehrere induktive Verbraucher gleichzeitig zugeschaltet sind. Diese Art von Kompensation ist wirtschaftlicher als die Einzelkompensation.

Am häufigsten wird die Zentralkompensation (**Bild 6**) eingesetzt. Hier wird die Blindleistung zentral zur Verfügung gestellt. Die Zentralkompensation wird in der Niederspannungs-Hauptverteilung (NSHV) oder auch zusätzlich an Unterverteilern

installiert. Die Vorteile liegen in dem unkomplizierten (auch nachträglichen) Einbau, sowie der einfachen Wartung der Anlage. Zudem wird die Kondensatorleistung besser ausgenutzt.

### Berechnung der benötigten kapazitiven Blindleistung

Vielleicht ist vielen noch die allgemeine Formel der kapazitiven Blindleistung bekannt, über die wir zur erforderlichen Kondensatorkapazität gelangen:

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

Die einzelnen Komponenten der Formel sind:

- $Q_c$  = die benötigte kapazitive Blindleistung
- $P$  = die aufgenommene Wirkleistung der Anlage oder der Maschine
- $\tan \varphi_1$  = Tangens des Phasenverschiebungswinkels vor der Kompensation
- $\tan \varphi_2$  = Tangens des Phasenverschiebungswinkels nach der Kompensation

In unserem Beispiel soll ein Motor auf den Wirkleistungsfaktor  $\cos \varphi_2 = 0,97$  kompensiert werden. Die aufgenommene Leistung beträgt  $P = 22$  kW mit einem  $\cos \varphi_1$  von 0,84. Setzt man diese Daten in die oben stehende Formel direkt ein erhält man:

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

$$Q_c = 22 \text{ kW} \times (0,646 - 0,25) = 8,7 \text{ kvar}$$

Die benötigte Kondensatorblindleistung beträgt also ca. 9 kvar. Festkondensatoren lassen sich näherungsweise auch über Tabellen bestimmen (Tabelle 1). Für unser Rechenbeispiel ergibt sich aus der Tabelle ein Wert von 8,8 kvar (40 % von 22 kW). Ein Wert, der dem errechneten Wert sehr nahe kommt.

Bei der Berechnung einer Zentralkompensation fehlen uns die Daten wie sie an einem Motor angegeben sind. Die Größe der benötigten Kompensationsleistung wird in der Praxis über aktuelle Stromabrechnungen berechnet (Tabelle 2) oder durch eine Langzeitmessung (Netzanalyse) festgelegt.

Dennoch lässt sich auch hier die benötigte Blindleistung mit Hilfe der schon bekannten Formel berechnen. In diesem Fall ist der für die Berechnung zu Grunde gelegte Wert der Wirkleistung in der Tabelle ganz oben zu finden (498 kW).

Den gewünschten Leistungsfaktor legt der Betriebstechniker fest. Meist liegt dieser Wert zwischen 0,92 und 0,97 induktiv. In unserem Fall berechnen wir die Blindleistungskompensation auf 0,95 induktiv, was einen in der Praxis sehr gängigen Wert darstellt.

Über die Daten aus der Stromabrechnung erhalten wir  $\tan \varphi_1$ :

$$\tan \varphi_1 = \frac{\text{Blindarbeit [kvarh]}}{\text{Wirkarbeit aus NT + HT [kWh]}}$$

$$\tan \varphi_1 = \frac{166023 \text{ kvarh}}{(78608 + 157716) \text{ kWh}} = 0,7025$$

Wir setzen also die gesamte Blindarbeit (statt der Blindleistung) mit der gesamten Wirkarbeit aus der Hoch- und Niedertarifzeit (HT+NT) in unsere Formel ein. Das können wir deswegen tun, weil sich die Zeit letztendlich wieder kürzen lässt und wir das gewünschte Ergebnis erzielen:

### Motor- zu Kondensatorleistung

Motornennleistung in kW	Kondensatorleistung in kvar
1 ... 3	50% der Motornennleistung
4 ... 10	45% der Motornennleistung
11 ... 29	40% der Motornennleistung
ab 30	35% der Motornennleistung

**Tabelle 1:** Näherungsweise Auswahl von Kompensationskondensatoren

$$Q_c = 498 \text{ kW} \times (0,7025 - 0,3287) = 186 \text{ kvar}$$

In diesem Beispiel wählen wir die nächste Größe einer Standardanlage mit 200 kvar aus.

### Messung zur Festlegung der Größe einer Kompensation

Die benötigte Leistung kann auch über eine Netzanalyse festgelegt werden. Hierzu wird ein geeignetes Messgerät über den Zeitraum von mindestens einer Woche in die Zuleitung zum Energieversorger eingebaut. Der Einbau erfolgt unter Spannung durch einen Fachmann mit angelegter Schutzausrüstung (Bild 7). Aus den gewonnenen Messdaten kann nicht nur die benötigte Größe der Kompensationsanlage festgelegt, sondern auch die Netzqualität nach EN 50160 beurteilt werden.

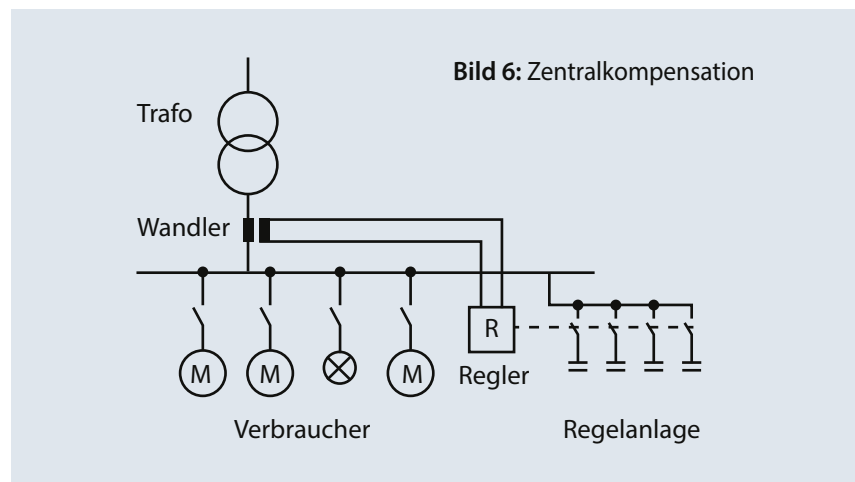
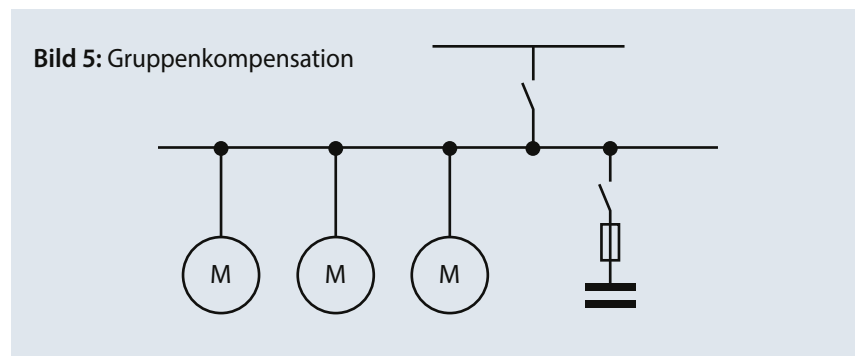
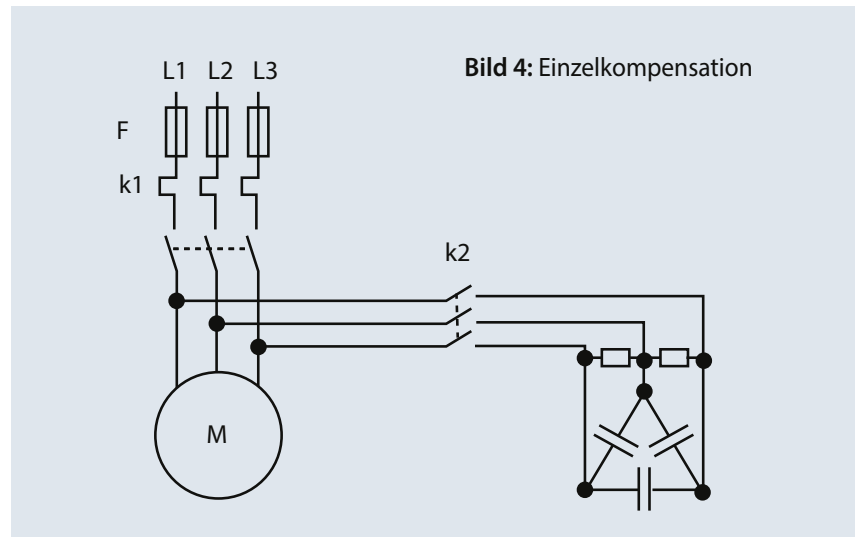
### Installation einer Blindleistungskompensation

Der Anschluss an die Verteilung erfolgt wie bei einem größeren Verbraucher. Der Kabelquerschnitt und die Vorsicherung werden passend zur gewählten Kompensation festgelegt. In unserem Beispiel nimmt die 200 kvar Anlage einen Strom von 288 A auf (1,44 A pro kvar). Der Kabelquerschnitt wird mit 3 x 240 / 120 mm<sup>2</sup> und die Vorsicherung mit 400 A gewählt.

Damit eine automatische Regelung erfolgen kann (Bild 8) benötigt der Regler den aktuellen  $\cos \varphi$ . Dieser lässt sich mit Hilfe einer Strom- und Spannungsmessung ermitteln. Die Messspannung entnimmt der Regler der Versorgungsspannung für die Kompensation. Über einen Stromwandler, der in die Zuleitung zu dem Energieverteiler eingebaut wird, kann der Regler jetzt die benötigte Blindleistung berechnen und die Kundenanlage auskompensieren (Bild 9).

### Wirtschaftliche Vorteile und Amortisation einer Blindleistungskompensationsanlage

Fakt ist, durch Kompensation lassen sich hohe Beträge in der Stromrech-



### Blindarbeitskosten

Lieferung	Zeitraum	Ermittlung von	Abrechnungswerte
Strom	1.06. – 30.06.2018	Leistung	498 kW
Strom	1.06. – 30.06.2018	Arbeit HT	78 608 kWh
Strom	1.06. – 30.06.2018	Arbeit NT	157 716 kWh
Strom	1.06. – 30.06.2018	Blindarbeit	166 025 kvarh
Verrechnete Blindarbeit abzüglich der Freigrenze (50 % von der Wirkarbeit):			47 863 kvarh

Tabelle 2: Beispiel einer vom Energieversorger bereitgestellten Stromabrechnung

nung einsparen. Bleiben wir bei unserem Beispiel aus der Tabelle 2. Dieser Musterbetrieb hatte eine maximale Leistungsaufnahme von 498 kW. Die Wirkarbeit bezog der Betrieb zu einer Hoch- und einer Niedertarifzeit (HT und NT). Die gesamte Wirkarbeitsaufnahme betrug 236 324 kWh. Laut dem Energieversorgungsstarif dürfen 50 % der Wirkarbeit kostenlos als Blindarbeit bezogen werden, das entspricht 118 162 kvarh.

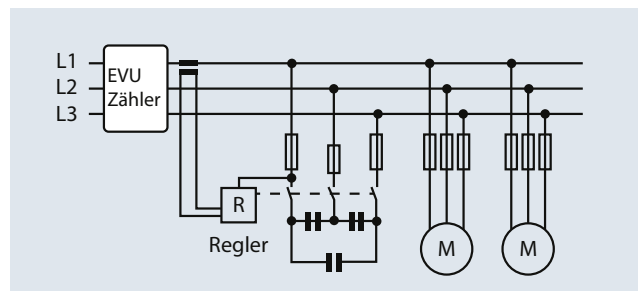
Zieht man diesen Wert von der gesamten Blindarbeit ab, so erhält man den in der Tabelle angegebenen Betrag von 47 863 kvarh.

Stünde dieser Betrieb in Hamburg und bezöge die Energie von Vattenfall über die Stadtwerke der Hansestadt, so müsste er 1,55 Cent pro kvarh an den Energieversorger zahlen, was einen jährlichen Betrag von ca. 8900 € ausmacht.

Für einen Betrieb mit höherer Leistung oder Betriebsdauer ergeben sich natürlich entsprechend höhere Einsparpotenziale. Dadurch ist die Amortisation einer neu installierten Kompensationsanlage unterschiedlich. Auf unser Beispiel bezogen gehen wir von einer Amortisationsdauer oder »payback period« von etwa zwei Jahren aus.



**Bild 7:** Einbau eines Netzanalysators in eine Verteilung



**Bild 8:** Schematischer Einbau einer Blindleistungkompensationsanlage



**Bild 9:** Blindleistungkompensationsanlage im Standschrank

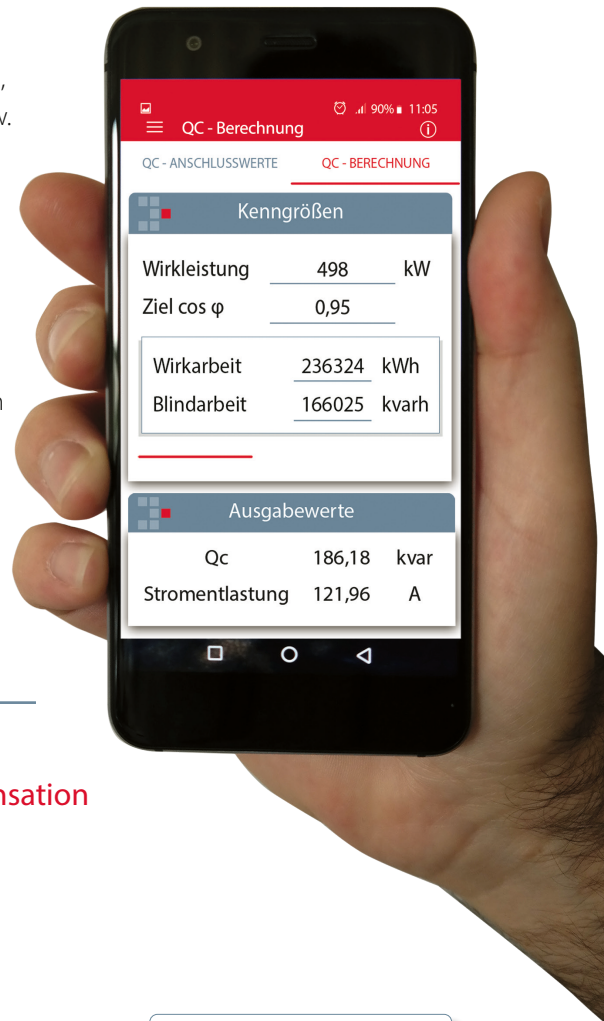
# Energietagebuch App „visual energy Home“

Mit dem kostenfreien Energietagebuch „visual energy Home“ behalten Sie spielend leicht den Überblick über Ihre Verbrauchsdaten und Kosten für Strom, Wasser, Gas sowie Kfz-Kraftstoff. Verbrauchsdaten können direkt am Zähler bzw. an der Zapfsäule eingegeben werden.

Dadurch gehört umständliches Notieren oder Merken von Zählerständen der Vergangenheit an. Weitere Zähler können individuell angelegt werden.

## Unterstützt werden folgende Funktionen:

- Eintragen von Zählerständen der Ressourcen Wasser, Strom, Gas
- Grafische Darstellung der von Ihnen verbrauchten Energie und deren Kosten
- Erstellen von Prognosen über den zukünftigen Energieverbrauch
- Dokumentation und grafische Darstellung Ihres Kraftstoffverbrauchs, Verlauf Kilometerstand, getankter Kraftstoff in Litern, durchschnittlicher Verbrauch, zurückgelegte Distanz
- und vieles mehr



## Unser Tipp: Tool für die Auslegung einer Blindleistungskompensation

Neben vielen anderen nützlichen Funktionen bietet das **Energietagebuch „visual energy Home“** auch Tools **für die Elektrofachkraft, den Elektroinstallateur, Elektroniker und Elektrotechniker...**

**...das ideale Werkzeug für die Auslegung einer Blindleistungskompensation.**

QC - ANSCHLUSSWERTE		QC - BERECHNUNG	
<b>Kondensatorleistung</b>			
2			
2,5			
3			
		kvar	
Stromaufnahme	Zuleitung	Absicherung	
2,88	4 x 1,5	10	
3,6	4 x 1,5	10	
4,32	4 x 1,5	10	
I(A) / Phase	Cu (mm <sup>2</sup> )	3 x I (A)	

Bestimmung von Stromaufnahme Zuleitung und Absicherung einer Kompensationsanlage.

QC - ANSCHLUSSWERTE		QC - BERECHNUNG	
<b>Kenngroessen</b>			
Wirkleistung	498	kW	
Ziel cos $\phi$	0,95		
Wirkarbeit	236324	kWh	
Blindarbeit	166025	kvarh	
<b>Ausgabewerte</b>			
Qc	186,18	kvar	
Stromentlastung	121,96	A	

QC - ANSCHLUSSWERTE		QC - BERECHNUNG	
<b>Kenngroessen</b>			
Wirkleistung	498	kW	
Ziel cos $\phi$	0,95		
<b>Ausgabewerte</b>			
		Aktueller cos $\phi$ 0,82	

<b>Ausgabewerte</b>			
Qc	183,92	kvar	
Stromentlastung	120,10	A	

Berechnung zur erforderlichen Blindleistung und Scheinstromreduzierung.

QC - ANSCHLUSSWERTE		QC - BERECHNUNG	
<b>Kenngroessen</b>			
Wirkleistung	498	kW	
Ziel cos $\phi$	0,95		
<b>Ausgabewerte</b>			
		Blindleistung 345 kvar	

<b>Ausgabewerte</b>			
Qc	181,32	kvar	
Stromentlastung	117,95	A	



Hier geht es direkt zu „visual energy Home“



Google Play und das Google Play-Logo sind Marken von Google LLC.

## Kompensation von Blindleistung

Thema des letzten Kapitels sind mögliche Störungen an Kompensationsanlagen, wann sie auftauchen und wie man ihnen begegnet und welche Vorichtsmaßnahmen es gibt.

Die Anzahl der elektronischen Verbraucher haben in den vergangenen Jahren stark zugenommen. Zum Beispiel werden Motoren immer häufiger mit Frequenzumrichtern betrieben, in Beleuchtungsanlagen sind elektronische Vorschaltgeräte (EVG) die Regel und in der Leistungselektronik finden sich häufig getaktete Netzteile.

### Störungen an Kompensationsanlagen

Die Stromaufnahme dieser Lasten ist nicht mehr sinusförmig und erzeugt an den Netzimpedanzen einen Spannungsfall. Dieser Spannungsfall beinhaltet neben der 50 Hz-Grundschwingung auch ein Vielfaches der Grundfrequenz. Diese sogenannten Oberschwingungsspannungen treten mit Frequenzen von 150 Hz, 250 Hz, 350 Hz etc. auf (**Bild 10**).

Hauptbestandteil einer Kompensationsanlage sind Kondensatoren. Die Frage, die sich an dieser Stelle ergibt lautet: Wie verhält sich ein Kondensator betrieben an einem Netz, in dem Oberschwingungsspannungen vor-

handen sind? Zunächst ist es wichtig sich die Abhängigkeit des Blindwiderstands  $X_C$  einer Kapazität von der Frequenz vor Augen zu führen:

$$X_C = \frac{1}{2 \times \pi \times f \times C}$$

Aus der Formel erkennen wir, dass bei höheren Frequenzen der Blindwiderstand  $X_C$  des Kondensators kleiner wird. Was bedeutet dies für uns in der Praxis?

Ein Kondensator nimmt je nach Belastung durch Oberschwingungsspannungen einen höheren Strom auf. Dieser höhere Strom verursacht im Kondensator eine höhere thermische Belastung, was in Folge zu einer verringerten Lebensdauer führt. Der ZVEI (Zentralverband der Elektroindustrie) gibt in einer Informationsbroschüre für die Lebensdauer von Leistungskondensatoren an, dass bei einer Überschreitung der maximalen Temperatur an der Kondensatoroberfläche um 7 °C sich die Lebensdauer halbiert.

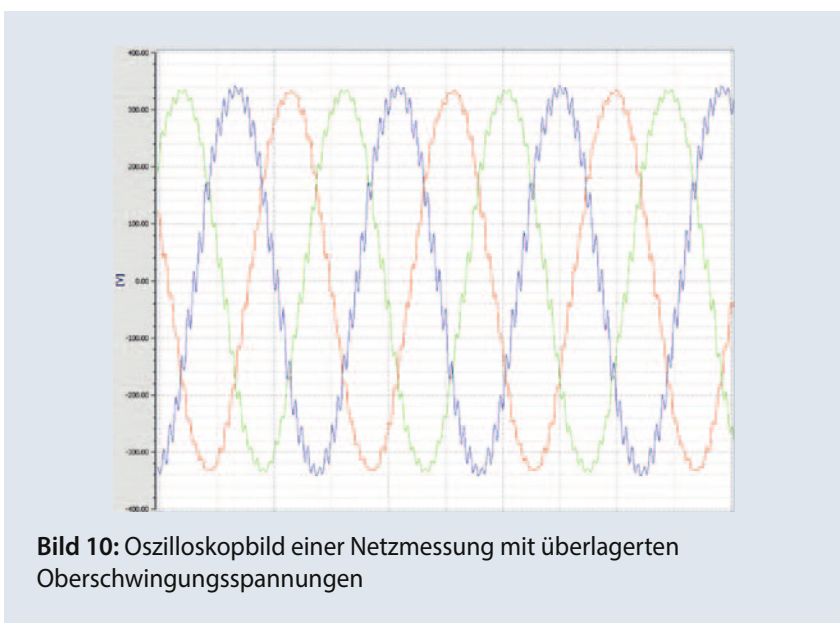
Ein weiteres Problem ist die mögliche Resonanz im Niederspannungsnetz. In diesem Fall ist der Blindwiderstand der Induktivität und der Kapazität bei einer bestimmten Resonanzfrequenz gleich groß. Der Transformator ist eine Induktivität, die aus der Mittelspannung betrachtet mit den Kondensatoren der Kompensationsanlage einen Reihenschwingkreis bildet (**Bild 11**). Die Resonanzfrequenz  $f_r$  lässt sich mit der folgenden Formel bestimmen:

$$f_r = \frac{1}{2 \times \pi \times \sqrt{L \times C}}$$

Eine Resonanz im Reihenschwingkreis kann eine Spannungserhöhung im Kilovoltbereich hervorrufen, die Schäden an der Kompensationsanlage oder den angeschlossenen Verbrauchern bewirken kann. Die möglichen Resonanzfrequenzen lassen sich berechnen, da die Induktivität des Transformators eine feste Größe darstellt und die Kompensationsanlage in festgelegten Leistungsstufen die Kondensatoren zuschaltet. Somit sind die Resonanzpunkte in diesem Reihenschwingkreis berechenbar. Durch die richtige Auswahl der Kondensatorstufen kann man so Resonanzen vermeiden.

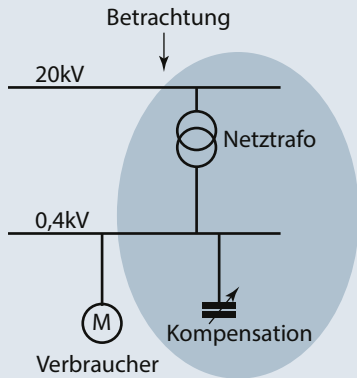
Anders sieht es aus, wenn wir das Netz aus der Niederspannung betrachten (**Bild 12**). Hier bilden induktive Verbraucher und der Transformator zusammen mit der Kompensationsanlage einen Parallelschwingkreis. Im Resonanzfall fließt hier ein hoher Strom zwischen Kondensatoren und Induktivitäten. Dieser Strom kann Werte im Kiloamperebereich annehmen und somit Kondensatoren als auch induktive Verbraucher zerstören.

Die induktiven Verbraucher im Niederspannungsnetz bilden zusammen mit dem Transformator eine Gesamtinduktivität, die sich ständig ändert. Folglich kann man die Resonanzfrequenz durch die Auswahl von geeigneten Kondensatorstufen nicht auf eine unkritische Frequenz legen.

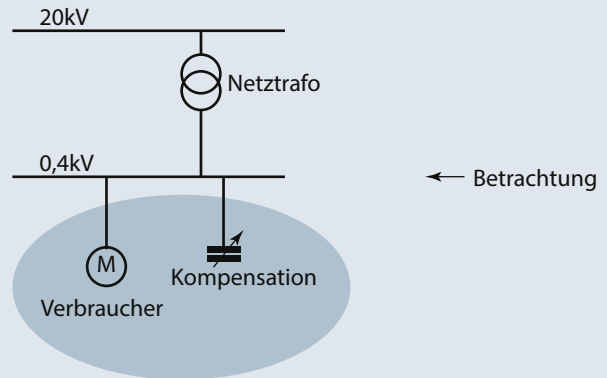


**Bild 10:** Oszilloskopbild einer Netzmessung mit überlagerten Oberschwingungsspannungen





**Bild 11:** Transformator und Kompensationsanlage aus Blickrichtung der Mittelspannung



**Bild 12:** Induktive Verbraucher und Kompensationsanlage aus Blickrichtung der Niederspannung

### Verdrosselte Kompensationsanlagen

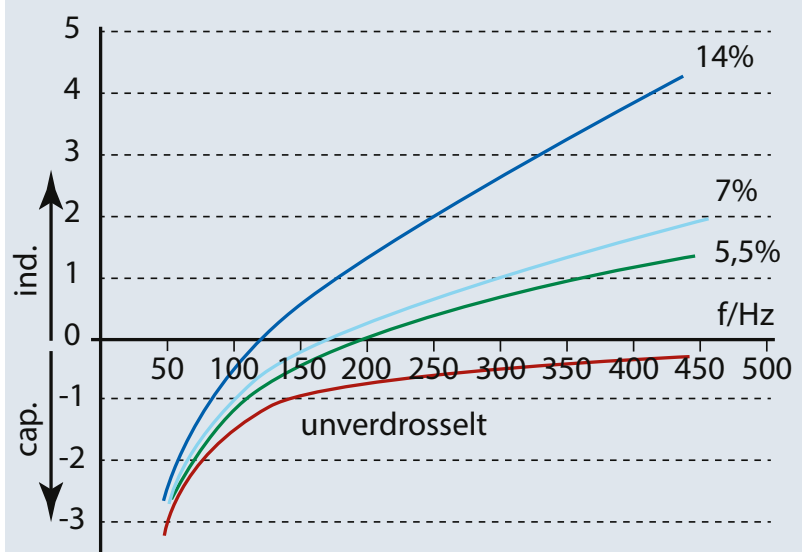
Um diesem Problem zu begegnen und wegen der stetig ansteigenden Oberschwingungsbelastung, verdrosselt man seit vielen Jahren Kompensationsanlagen.

Bei einer Verdrosselung wird jede Kondensatorstufe als Reihenschwingkreis mit in Reihe geschalteter Drossel aufgebaut (**Bild 13**). Durch die Drossel, die der Kondensatorstufe vorgeschaltet wird, erreicht man eine definierte Reihenresonanzfrequenz.

Gängige Verdrosselungsfaktoren sind im Bild 14 aufgelistet. Unterhalb der resultierenden Frequenz der Verdrosselung wirkt die Kondensatorstufe kapazitiv. Darüber wirkt die Stufe wie eine Induktivität. Legt man die Reihenresonanzfrequenz der verdrosselten Kompensationsanlage unterhalb der kleinsten möglichen Oberschwingungsspannung (z. B. 150 Hz, 250 Hz) können keine Resonanzen auftreten, da zwei Induktivitäten keinen Schwingkreis bilden können (**Bild 14**).



**Bild 13:** Ersatzschaltbild einer verdrosselten Kompensationsstufe



**Bild 14:** Verlauf von verdrosselten Kompensationsanlagen



## Sie wünschen mehr Informationen über die Sicherheitskonzepte von KBR?

Am besten gleich die Broschüre „KBR Sicherheitskonzepte“ per E-Mail anfordern: [info@kbr.de](mailto:info@kbr.de)

### Wartung von Kompensationsanlagen

Kondensatoren und Schütze sind Verschleißteile. Daher sollte man diese Kompensationsanlagen einer regelmäßigen Wartung (empfohlen mindestens jährlich) unterziehen. Bei einer Wartung werden außer einer Sichtprüfung und Reinigung der Filtermatten, die Schaltspiele der Schütze vom Regler ausgelesen. Messtechnisch überprüft man, ob der Verschleiß (Verlust der Kapazität) im unkritischen Bereich liegt. Tatsächlich erfolgt die Durchführung dieser wichtigen Wartung in der Praxis recht selten oder gar nicht.

Jedoch kann bei verdrosselten Kompensationsanlagen eine vernachlässigte Wartung zu hohen Schäden an der Anlage führen. Angenommen eine Kompensationsanlage ist mit einer Verdrosselung von 14 % eingebaut. Die Resonanzfrequenz der einzelnen Stufen liegt bei 134 Hz. Verringert sich die Kapazität des Kondensators aufgrund seiner Betriebsstunden, steigt die in unserem Beispiel vorher fest definierte Frequenz von 134 Hz langsam an.

Steigt die Frequenz in der vom Verschleiß betroffenen Stufe so an, dass die nächste Oberschwingung (in unserem Beispiel die 150 Hz) erreicht

wird, kommt es zu einem stark ansteigenden Stromfluss. Dieser kann einen Kondensator zerstören und im Extremfall zu einer Explosion führen. Dadurch entstehen in der Anlage teilweise erhebliche Schäden.

### Sicherheits- und Wartungskonzepte

Um dies zu umgehen, gibt es herstellerspezifische Sicherheits- und Wartungskonzepte. Diese Systeme überwachen beispielsweise innerhalb einer Anlage die kritischen Bauteile und melden frühzeitig mögliche Fehler. Falls die detektierten Bauteile nicht ausgetauscht werden, verhindert das System aus Sicherheitsgründen die Zuschaltung der betreffenden Stufe. Damit erhöht sich die Betriebssicherheit beträchtlich. Allerdings ersetzen diese Sicherheitssysteme für Kompensationsanlagen nicht vollständig die regelmäßige Überprüfung durch das Wartungspersonal.

### Fazit

Eine sauber geplante und gut gewartete Kompensationsanlage trägt aktiv zu einer erheblichen Einsparung der Energiekosten, sowie zur Reduzierung des umweltschädlichen Kohlendioxids (CO<sub>2</sub>) bei. Dies ist sowohl im Sinne des Endkunden, als auch des Betreibers einer Anlage.

*Christian Wiedemann*

**secureC** ist ein von KBR entwickeltes innovatives Sicherheits- und Wartungskonzept, das wichtige Funktionen vereint, um maximale Sicherheit und hohe Verfügbarkeit beim Betrieb einer Blindleistungskompensationsanlage zu gewährleisten.

### Vorteile

- Maximale Verfügbarkeit der Anlage
- Hohe Sicherheit durch Überwachung der einzelnen Schaltstufen
- Beste KBR Serviceleistungen

### Das Konzept

Sicherheit besitzt bei Blindleistungsanlagen eine zentrale Bedeutung. Deswegen hat KBR das **Sicherheits und Wartungskonzept secureC** entwickelt, das eine maximale Verfügbarkeit einer Kompensationsanlage verfolgt – auch in Netzen, die stark mit Oberschwingungen belastet sind. Grundlage des Konzepts sind KBR Qualitätsprodukte. Eine zuverlässige Überwachung von Resonanzfrequenz, Stufen-Vorsicherung und Schutzkontakten ermöglicht secureC. Für zusätzlichen Schutz vor Ausfall sorgt ein spezielles Temperatur-Management. Findet zudem die webbasierte Analysesoftware **visual energy** Verwendung, ist bereits vom Arbeitsplatz aus eine detaillierte Fehleranalyse möglich. Das secureC-Qualitätslabel kennzeichnet entsprechende Kompensationsanlagen.

Überwachen



Analysieren

Optimieren

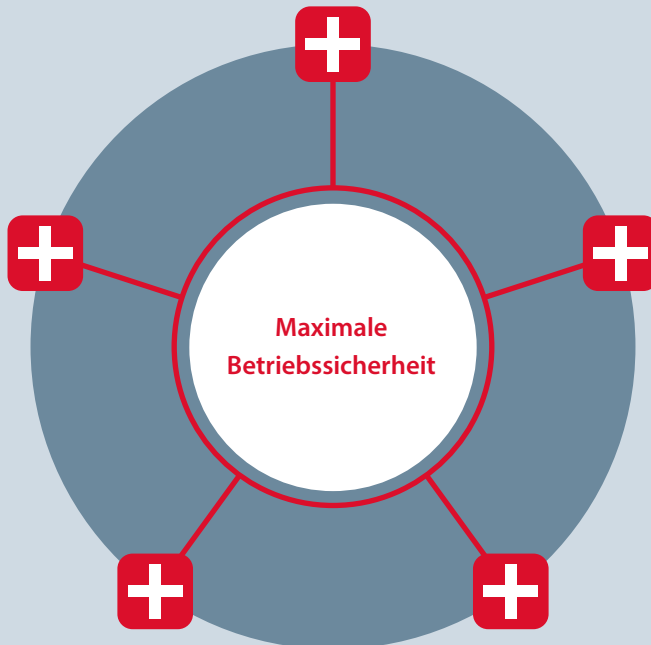


secureC<sup>®</sup>

### KBR Sicherheitskonzept

Kompensationsanlage mit  
geprüften Qualitätskomponenten  
von KBR.

Automatische  
Abschaltung von  
defekten Stufen



Hohe Sicherheit  
durch Überwachung

Ständige  
Fehleranalyse

Temperatur-Management

Wartungs- und Fehlermeldungen  
einzelner Stufen

Maximale  
Betriebssicherheit

**Ressourcen schonen, Energieeffizienz steigern und Kosten senken:  
KBR ist der Experte für optimierte Energienutzung.**

Als familiengeführtes Unternehmen unterstützen wir bereits seit 1976 Betriebe weltweit dabei, Energie jeglicher Form, wie Strom, Gas, wasser u.v.m., effizienter einzusetzen. Mit maßgeschneiderten Lösungen begleiten wir unsere Kunden auf ihrem Weg zu einer nachhaltigen und wettbewerbsfähigen Zukunft.

Unsere Hard- und Softwareprodukte entwickeln und produzieren wir in unserem Werk in Schwabach selbst. Wir legen all unser Knowhow, unsere Kreativität und Kraft in die Weiterentwicklung des betrieblichen Energiemanagements.

Weil Energie kostbar ist.

**Das betriebliche Energiemanagement für jede Anforderung.**

- Energiekosten senken
- Betriebssicherheit steigern
- Ressourcen schonen
- CO<sub>2</sub> reduzieren
- System flexibel erweitern

**KBR Kompensationsanlagenbau GmbH**

Am Kieferschlag 7  
D-91126 Schwabach

T +49 (0) 9122 6373 -0  
E [info@kbr.de](mailto:info@kbr.de)

[www.kbr.de](http://www.kbr.de)