

Klassische Kompensation versus aktive Netzoptimierung

Was geschaltete Kondensatoranlagen leisten, wo sie an Grenzen stoßen und was eine aktive Anlage zusätzlich erreicht

Technischer Bericht (Whitepaper)

Worum es in diesem Whitepaper geht

Viele Betriebe besitzen bereits eine Kompensationsanlage: einen Schaltschrank mit Kondensatorstufen, die ein Regler über Schütze zu- und abschaltet. Sie wurde eingebaut, um den Verschiebungsfaktor $\cos \varphi$ zu verbessern, und das tut sie zuverlässig. Daraus folgt die naheliegende Frage, was eine aktive dynamische Strom- und Netzoptimierungsanlage darüber hinaus leistet - und ob sich der Unterschied in Kilowattstunden zeigt.

Dieses Whitepaper beantwortet die Frage auf zwei Ebenen. Der nächste Abschnitt fasst die Ergebnisse für Entscheider zusammen. Danach folgen für Elektrofachkräfte und Fachplaner Wirkprinzip, Grenzen und eine durchgerechnete Gegenüberstellung, jede Aussage mit Fundstelle. Der Vergleich behauptet nicht, dass klassische Anlagen nichts sparen: Sie senken die Stromwärmeverluste vor ihrer Einbaustelle messbar. Er zeigt, wo dieser Effekt endet und was danach noch zu holen ist.

Die Ergebnisse auf einen Blick

- > **Beide Techniken senken den Strom**, den Kabel, Schaltanlage und Transformator führen - und damit Verluste, die der Zähler am Übergabepunkt als Wirkarbeit abrechnet.
- > **Eine Kondensatoranlage korrigiert nur die Verschiebung der Grundschiwingung.** Ihre Bemessungsleistung bezieht sich ausschließlich auf diesen Anteil (Brückl und Haslbeck 2013, S. 9). Oberschwingungsströme und Schiefast bleiben bestehen.
- > **Kondensatoren bilden mit dem Netz Schwingkreise.** Unverdrosselt können sie vorhandene Oberschwingungen verstärken; verdrosselt sind sie sicher, gleichen Oberschwingungen aber nicht gezielt aus.
- > **Geschaltete Anlagen arbeiten in Stufen** und müssen vor jedem erneuten Zuschalten die Entladung der Kondensatoren abwarten. Schnellen Lastwechseln folgen sie nicht.
- > **Eine aktive Anlage erzeugt den Ausgleichsstrom stufenlos**, in beide Richtungen und innerhalb von höchstens 5 Millisekunden. Sie gleicht zusätzlich Oberschwingungen und Schiefast aus und bildet keinen Resonanzkreis.
- > **Gemessen in ESO-Referenzbetrieben: im Mittel 12,4 Prozent weniger Stromverbrauch.** Die Spanne reicht von 9 bis 21 Prozent. Im durchgerechneten Beispiel einer alten Installation holt eine klassische Anlage 4 bis 6 Prozentpunkte des Jahresverbrauchs, eine aktive Anlage rund 9 bis 12 - einschließlich der Verluste in Neutralleiter, Transformator und Motoren, die nur die aktive Technik gezielt angeht.

Wie eine klassische Kompensationsanlage arbeitet

Induktive Verbraucher - Motoren, Transformatoren, Drosseln - benötigen einen Stromanteil zum Aufbau ihrer Magnetfelder. Er pendelt zwischen Netz und Verbraucher, verrichtet keine Arbeit und belastet trotzdem jede Leitung auf dem Weg. Ein Kondensator kann diesen Anteil vor Ort bereitstellen: Induktiver und kapazitiver Strom gleichen sich gegenseitig aus, und das vorgelagerte Netz muss ihn nicht mehr liefern (Brückl und Haslbeck 2013, S. 8).

Weil der Bedarf eines Betriebs schwankt, ist die Anlage in Stufen aufgeteilt. Ein Regler misst Strom und Spannung, vergleicht den Leistungsfaktor mit dem Sollwert und schaltet Kondensatorstufen zu oder ab. Je mehr Stufen vorhanden sind und je kleiner der Abstand zwischen ihnen, desto genauer trifft die Anlage den Bedarf (ABB 2008, S. 11). Typisch sind Stufenreihen bis 1:2:4:4 (Brückl und Haslbeck 2013, S. 10). Als Schaltgeräte dienen meist Schütze; nur bei schnell wechselndem Bedarf oder häufigen Schaltungen werden in der Niederspannung Thyristorschalter eingesetzt (ebd.).

Der Effekt auf die Verluste

Der Nutzen ist real und gut belegt. Die Stromwärmeverluste wachsen mit dem Quadrat des Stroms. Steigt der Leistungsfaktor, sinkt bei gleicher Wirkleistung der Strom und mit ihm die Verluste - in allen Teilen der Anlage, die vor der Einbaustelle liegen (ABB 2008, S. 6):

$$\Delta p = 1 - \left(\frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \right)^2$$

Eine Anhebung von 0,7 auf 0,9 senkt die Verluste damit um rund 39,5 Prozent, eine Anhebung von 0,7 auf 0,95 um 45,7 Prozent (ebd., Tab. 2.3). Gemeint sind Prozent der Verluste, nicht des Verbrauchs. Welcher Anteil des Jahresverbrauchs daraus wird, hängt vom Verlustniveau der Installation ab; das rechnet der Abschnitt „Die Gegenüberstellung in Zahlen“ durch.

Wo die klassische Anlage an Grenzen stößt

Oberschwingungen bleiben im Netz

Frequenzumrichter, Stromrichter, Computer, Leuchtstoff- und Entladungslampen, Schweißgeräte und USV-Anlagen nehmen den Strom nicht sinusförmig auf (ABB 2008, S. 21). Ihre Oberschwingungsströme erhöhen den Effektivwert des Stroms und damit die Verluste genauso wie der nicht wirksame Anteil der Grundschwingung. Für diesen Anteil ist eine Kondensatoranlage nicht gebaut: Ihre Bemessungsleistung bezieht sich ausschließlich auf die Verschiebung der Grundschwingung (Brückl und Haslbeck 2013, S. 9).

Wie stark das ihre Wirkung begrenzt, zeigt der Gesamtleistungsfaktor λ :

$$\lambda = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + \text{THD}_i^2}} \quad \frac{P_V}{P_{V,0}} = \frac{1}{\lambda^2}$$

Der Verschiebungsfaktor $\cos \varphi$ ist der Teil, den ein Kondensator verbessert; der Term mit dem Stromverzerrungsgrad THD_i bleibt stehen. Die Stromwärmeverluste P_V wachsen gegenüber dem Idealzustand $P_{V,0}$ mit $1/\lambda^2$ (McCoy und Douglass 2014, S. 9-11; Brückl und Haslbeck 2013, S. 9). In der alten Installation des Rechenbeispiels weiter unten kommt eine Kondensatoranlage mit $\cos \varphi = 0,95$ deshalb nur auf $\lambda = 0,82$; selbst eine ideal auf $\cos \varphi = 1$ geregelte Anlage käme nicht über $\lambda = 0,85$ hinaus (eigene Rechnung). Dabei steigt der Verzerrungsgrad nach der Kompensation sogar: Die Grundschiwingung wird kleiner, die Oberschwingungsströme bleiben gleich, im Beispiel wächst THD_i von 40 auf 58 Prozent (eigene Rechnung).

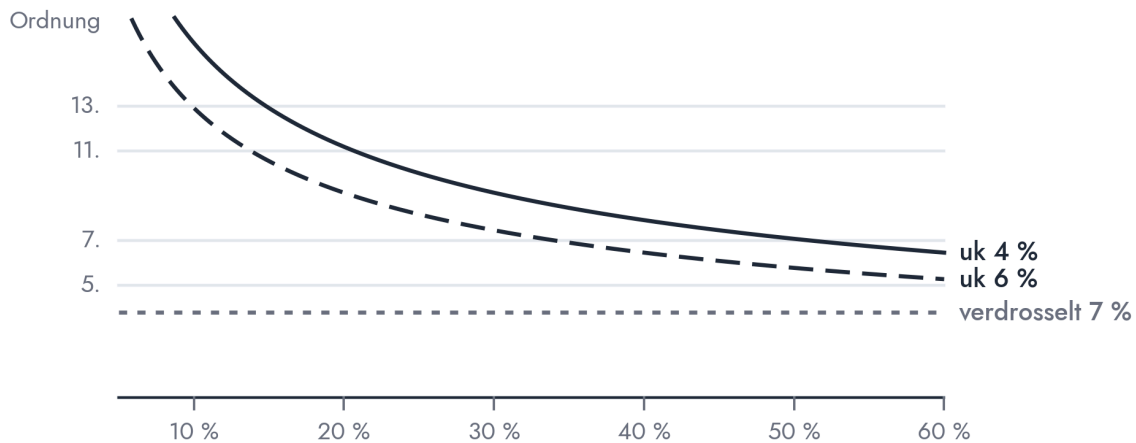
Schon ohne Resonanz belasten Oberschwingungen die Kondensatoren selbst: Ihr Wechselstromwiderstand sinkt mit der Frequenz, in verzerrter Spannung ziehen sie deshalb zusätzlichen Strom (ABB 2008, S. 21). Die Normen IEC 60831-1 und IEC 60931-1 verlangen, dass Kondensatoren dauerhaft das 1,3-Fache ihres Bemessungsstroms vertragen (ebd., S. 26). Strom, Temperatur und Spannung bestimmen ihre Lebensdauer (TDK Electronics 2025, S. 146).

Kondensatoren bilden mit dem Netz Schwingkreise

Mit der Induktivität des vorgelagerten Netzes - im Wesentlichen dem Transformator - bildet jede Kondensatoranlage einen Schwingkreis. Es gibt immer mindestens eine Frequenz, bei der Kondensatoren und Netz in Parallelresonanz stehen (ABB 2015, S. 15). Ihre Lage folgt aus dem Verhältnis der Reaktanzen (ABB 2008, S. 22):

$$f_r = f_1 \cdot \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{L1}}} \approx f_1 \cdot \sqrt{\frac{S_k}{Q_C}}$$

Darin ist S_k die Kurzschlussleistung am Einbauort und Q_C die zugeschaltete Kompensationsleistung; die Näherung rechts folgt aus $X_{L1} = U^2/S_k$ und $X_{C1} = U^2/Q_C$ (ebd., S. 25 und 27). Liegt die Resonanzstelle nahe einer Oberschwingung, die im Netz vorhanden ist, wird diese nicht gedämpft, sondern verstärkt: Kondensatoren, Transformatoren und Leitungen werden überlastet, die Spannungsverzerrung steigt, Mess- und Steuertechnik wird gestört (TDK Electronics 2025, S. 74). Typisch liegt die Eigenresonanz zwischen 250 und 500 Hertz, also bei der 5. und 7. Oberschwingung (ebd.) - genau dort, wo Sechspuls-Umrichter ihre größten Anteile erzeugen (ABB 2015, S. 14).



Ordnung der Parallelresonanz einer unverdrosselten Kondensatoranlage am Transformator, abhängig von der zugeschalteten Kompensationsleistung in Prozent der Transformatorleistung, für eine Kurzschlussspannung u_k von 4 und 6 Prozent bei starrem Vornetz. Die hellen Linien markieren die 5., 7., 11. und 13. Ordnung. Jede Schaltstufe hat ihre eigene Resonanzstelle; die Verdrosselung mit 7 Prozent legt sie fest auf 189 Hertz. Eigene Rechnung nach ABB (2008, S. 18, 22 und 25).

Weil jeder Schaltzustand einer geregelten Anlage eine eigene Resonanzfrequenz besitzt, können mehrere Ordnungen des Spektrums bedenklich werden (Brückl und Haslbeck 2013, S. 11). Die übliche Abhilfe ist die Verdrosselung: Eine Drossel in Reihe zum Kondensator legt die Resonanzstelle unter die niedrigste vorkommende Oberschwingung, oberhalb davon wirkt der Zweig induktiv und kann keine Resonanz mehr mit dem Netz bilden (ebd.; TDK Electronics 2025, S. 147). Bei einem Verdrosselungsgrad p von 7 Prozent liegt sie bei 189 Hertz (Brückl und Haslbeck 2013, S. 12):

$$f_r = \frac{f_1}{\sqrt{p}} = \frac{50 \text{ Hz}}{\sqrt{0,07}} \approx 189 \text{ Hz}$$

Kondensatoranlagen werden deshalb heute typischerweise verdrosselt ausgeführt (ebd., S. 11); für Netze mit Oberschwingungen sieht TDK ausschließlich verdrosselte Anlagen vor (TDK Electronics 2015, S. 8). Die Verdrosselung macht die Anlage sicher, aber nicht zum Filter: Je nach Abstimmung nimmt sie einen Teil des Oberschwingungsstroms auf, der Rest fließt weiter ins Netz (ebd.). Ihre Auslegung verlangt genaue Kenntnis von Oberschwingungsbelastung und Netzimpedanz, auch mit Blick auf die Rundsteuerfrequenz des Netzbetreibers (Brückl und Haslbeck 2013, S. 12).

Schieflast bleibt bestehen

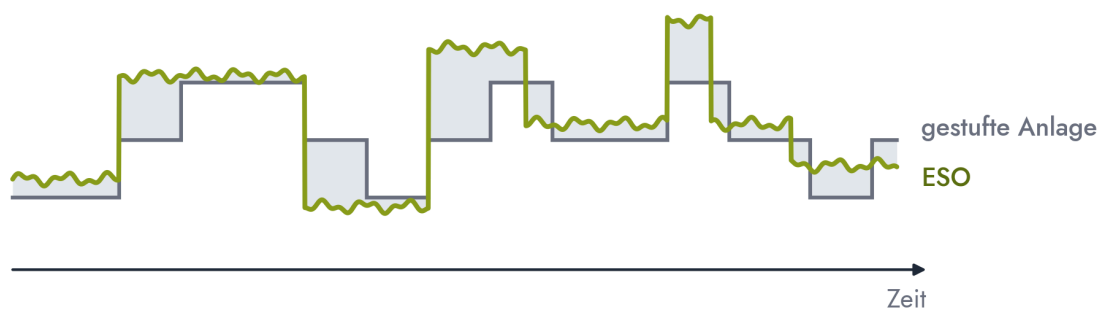
Ungleich belastete Außenleiter verursachen Ausgleichsströme, Zusatzverluste in Leitungen und Neutralleiter (Pană 2011, S. 219) und vor allem Wirkungsgradverluste in Drehstrommotoren: Bei 2,5 Prozent Spannungsunsymmetrie fällt der Wirkungsgrad eines voll belasteten 75-kW-Motors von 94,4 auf 93,0 Prozent (U.S. DOE 2012, S. 1-2). Die Unsymmetrie ist ein eigener Anteil

neben Verschiebung und Verzerrung; Kondensatoranlagen werden für die Verschiebung eingesetzt (Brückl und Haslbeck 2013, S. 9).

Symmetrieren lässt sich mit Kondensatoren und Drosseln nur über eine gezielt unsymmetrische Schaltung, die auf eine bestimmte Last abgestimmt ist. Diese Steinmetz-Schaltung wird üblicherweise für große einphasige Lasten im Megawattbereich eingesetzt, etwa Induktionsöfen und Bahnstromversorgungen; ändert sich die Last, müssen Kapazitäten und Induktivität mitgeregelt werden (Pană 2011, S. 225). Bei Oberschwingungsfrequenzen erzeugt sie selbst eine starke Unsymmetrie (ebd., S. 226). In der gewöhnlichen Kompensationsanlage eines Gewerbebetriebs ist sie nicht vorgesehen.

Stufen und Schaltpausen

Eine geschaltete Anlage regelt nur so fein, wie ihre Stufen es zulassen; zwischen zwei Stufen liegt sie zwangsläufig über oder unter dem Bedarf. Dazu kommt die Zeit. Vor dem erneuten Zuschalten muss ein Kondensator auf höchstens 10 Prozent seiner Bemessungsspannung entladen sein; übliche Entladewiderstände brauchen bis zu 60 Sekunden, um ihn auf 75 Volt zu bringen (TDK Electronics 2015, S. 7). Die Norm IEC 60831-1 lässt dafür bis zu drei Minuten zu (ABB 2008, S. 28). ABB folgert daraus, dass eine schützgeschaltete Anlage für Lasten mit häufig wechselndem Bedarf zu langsam antworten kann (ebd., S. 35).



Regelverhalten schematisch. Die gestufte Anlage schaltet je Schritt eine Stufe und wartet danach die Entladung ab; die grauen Flächen zeigen Über- und Unterkompensation. Die aktive Anlage folgt dem Bedarf stufenlos, ihre Linie deckt sich mit dem Bedarf. Darstellung nach dem Prinzip in ABB (2008, S. 35).

Jedes Zuschalten gleicht zudem einem kurzen Kurzschluss: Der Einschaltstrom erreicht das 25- bis 200-Fache des Bemessungsstroms bei Frequenzen von 1 bis 15 Kilohertz (ABB 2008, S. 26) und belastet Schütze und Kondensatoren. Kondensatorschütze sind auf 100.000 bis 250.000 Schaltspiele ausgelegt (ebd., S. 33-34), Kondensatoren nach IEC 60831 auf höchstens 5.000 Schaltungen im Jahr (TDK Electronics 2025, S. 147). Die Schaltpause ist also kein Mangel einer einzelnen Anlage, sondern Teil ihres Schutzkonzepts.

Thyristorgeschaltete Anlagen umgehen die Schaltpause: Sie schalten im passenden Augenblick ohne Einschaltstromspitze und folgen schnellen Lastwechseln (ABB 2008, S. 35). Sie bleiben aber gestufte Kondensatoranlagen (Brückl und Haslbeck 2013, S. 11, Tab. 1) - für Oberschwingungen, Resonanz und Schiefast gilt dasselbe wie oben.

Nur eine Richtung

Kondensatoren gleichen nur induktives Verhalten aus (Brückl und Haslbeck 2013, S. 11, Tab. 1). Verhält sich ein Netzabschnitt selbst kapazitiv, hat die Anlage nichts beizutragen, und jede zu große Stufe kompensiert über. Die ZVEI-Studie mahnt ausdrücklich, Überkompensation zu vermeiden (ebd., S. 7).

Was eine aktive Anlage anders macht

Eine aktive dynamische Strom- und Netzoptimierungsanlage arbeitet nicht mit geschalteten Kapazitäten, sondern als geregelte Stromquelle.

ESO ist eine aktive, dynamische, halbleitergesteuerte, stufenlose elektronische Strom- und Netzoptimierungsanlage für induktive und kapazitive Lasten.

Ein Rogowski-Spulensatz misst den Laststrom. Ein Signalprozessor zerlegt ihn in Wirkstrom, nicht wirksamen Stromanteil, Oberschwingungsströme und Gegensystem; die Leistungshalbleiter erzeugen die unerwünschten Anteile gegenphasig, getaktet mit bis zu 25,6 Kilohertz. Am Anschlusspunkt überlagern sich beide Ströme, aus dem Netz fließt nur noch der Anteil, der Arbeit verrichtet (Technische Dokumentation der ESO-Anlage 2026).



Wirkprinzip, vereinfacht: Der gemessene Laststrom und der gegenphasig erzeugte Kompensationsstrom ergeben zusammen einen sinusförmigen Netzstrom.

Daraus folgen die Unterschiede zur Kondensatoranlage, Punkt für Punkt (alle Kennwerte: Technische Dokumentation der ESO-Anlage 2026):

- > **Stufenlos und in beide Richtungen.** Die Anlage erzeugt einen Strom beliebiger Größe und Phasenlage, für induktive wie kapazitive Lasten. Am Messpunkt erreicht sie einen Leistungsfaktor von mindestens 0,99.
- > **Schnell, ohne Schaltpause.** Die Anfangsreaktion der Leistungsstufe liegt unter 50 Mikrosekunden. Nicht wirksamer Stromanteil und Schiefast sind in höchstens 5 Millisekunden ausgeregelt; Oberschwingungen innerhalb weniger Netzperioden, weil ihre Erkennung eine Spektralanalyse über mindestens eine Periode voraussetzt.
- > **Oberschwingungen.** Ausgeglichen werden die Ordnungen 2 bis 13, dafür stehen 60 Prozent der Bemessungsleistung zur Verfügung; gerade Ordnungen können auf Anfrage werkseitig aktiviert werden. Die Stromverzerrung am Messpunkt sinkt auf höchstens 5 Prozent.
- > **Schiefast.** Die Anlage verlagert Wirkleistung zwischen den Außenleitern und senkt die Unsymmetrie auf höchstens 5 Prozent; im Vierleiternetz sinkt dadurch zugleich der Neutralleiterstrom.
- > **Keine Resonanz.** Im geregelten Frequenzbereich stellt die Anlage keine Kapazität dar, sondern eine Stromquelle mit hoher Ausgangsimpedanz. Ein Parallelschwingkreis wie bei der Kondensatoranlage entsteht nicht, eine Verdrosselung entfällt; oberhalb der Regelbandbreite wirkt das Ausgangsfilter der Anlage.
- > **Kein Verschleiß durch Schalthandlungen.** Im Leistungspfad gibt es keine mechanischen Schaltvorgänge.

Dasselbe Prinzip beschreibt die Fachliteratur für aktive Filter: Sie speisen ein inverses Stromspektrum ein und gleichen Oberschwingungsströme am Anschlusspunkt fast vollständig aus; begrenzte Schaltfrequenzen und endliche Regelzeiten verhindern eine vollständige Annäherung an die Sinusform (Brückl und Haslbeck 2013, S. 12). ABB nennt für solche Geräte drei Funktionen zugleich: das Filtern von Oberschwingungen, die Korrektur des Leistungsfaktors für induktive wie kapazitive Lasten und die Symmetrierung, die zugleich den Neutralleiterstrom senkt (ABB 2008, S. 37).

Anfangsreaktion

■ $\leq 50 \mu\text{s}$

vollständige Ausregelung

■ $\leq 5 \text{ ms}$

Netzperiode 50 Hz

■ 20 ms

geschaltete Kompensation

■ 40 bis 60 s

100 μs 1 ms 10 ms 100 ms 1 s 10 s

Reaktionszeiten auf logarithmischer Zeitachse: Anfangsreaktion und vollständige Ausregelung der aktiven Anlage im Vergleich zur Netzperiode und zur Schaltpause geschalteter Kompensationsanlagen.

Was die aktive Anlage nicht leistet

- > Sie gleicht Ströme aus, keine Spannungen. Eine aus dem vorgelagerten Netz eingespeiste Spannungsverzerrung beseitigt sie nicht; ausgelegt ist sie für einen Spannungsverzerrungsgrad unter 10 Prozent am Anschlusspunkt.
- > Sie ist kein Überspannungsschutz, keine unterbrechungsfreie Stromversorgung und kein Spannungsreduziergerät.
- > Wo keine Störfaktoren vorliegen, gibt es keinen Ansatzpunkt: Bei überwiegend ohmscher, symmetrischer und linearer Last bleibt sie wirkungslos.
- > Die Kennwerte - Leistungsfaktor mindestens 0,99, Stromverzerrung und Unsymmetrie höchstens 5 Prozent - gelten ab einer Auslastung von 50 Prozent des Kompensationsstroms und bis zur Bemessungsleistung.

Die Gegenüberstellung in Zahlen

Was die Unterschiede in Kilowattstunden bedeuten, lässt sich beziffern, wenn man die Verluste im Unternehmensnetz in einen Grundverlust und Zuschläge zerlegt. Der Grundverlust ist die Verlustenergie in Transformator, Kabeln und Verteilung bei idealem Betrieb. Für die Kabel errechnet die Ecodesign-Vorstudie der Europäischen Kommission im Mittel 2,04 Prozent der transportierten Energie, gerechnet mit einem Leistungsfaktor von 0,90, in Industrieanlagen eine Spanne von 1 bis 8 Prozent (Van Tichelen u. a. 2013, S. 54 und 56); auf $\cos \varphi = 1$ zurückgerechnet sind das 1,65 Prozent. Ein neuer Öltransformator mit 1.000 kVA nach Ökodesign-Stufe 2 (Leerlauf 693 W, Kurzschluss 7.600 W) kommt bei 30 Prozent Last auf

0,46 Prozent (Europäische Kommission 2014, Anhang I). Zusammen sind das rund 2 Prozent bei einer modernen Installation; für eine alte, weitläufige Installation mit knappen Querschnitten und älterem Transformator sind rund 5 Prozent angesetzt. Leistungsfaktor und Oberschwingungen erhöhen den Grundverlust über den Gesamtleistungsfaktor λ . Die Schiefast wirkt über den Wirkungsgrad der Motoren: Bei 2,5 Prozent Unsymmetrie verbraucht ein Motor 1,5 Prozent mehr (U.S. DOE 2012, S. 1-2); bei einem Anteil der Motorsysteme von 72 Prozent am industriellen Stromverbrauch (IEA 4E EMSA 2025, S. 1) sind das rund 1,1 Prozent des Verbrauchs.

Annahmen der Rechnung

- Beide Installationen: Verschiebungsfaktor 0,65, Stromverzerrung 40 Prozent und 2,5 Prozent Spannungsunsymmetrie. Sie unterscheiden sich nur im Grundverlust: 5 Prozent in der alten, weitläufigen Installation, 2 Prozent in der modernen, kurzen Installation.
- Klassische Anlage: Verschiebungsfaktor 0,95, der erste Schritt, den die ZVEI-Studie empfiehlt (Brückl und Haslbeck 2013, S. 46). Die Oberschwingungsströme bleiben in ihrer Höhe gleich; weder die teilweise Aufnahme durch eine Verdrosselung noch eine Resonanzverstärkung ist angesetzt.
- Aktive Anlage: Leistungsfaktor 0,99 und Stromverzerrung 5 Prozent am Messpunkt, Schiefast ausgeglichen (Technische Dokumentation der ESO-Anlage 2026).
- Beide Techniken wirken nur vor ihrer Einbaustelle (ABB 2008, S. 6; McCoy und Douglass 2014, S. 9-11). Im Modell der Ecodesign-Vorstudie entfallen 1,67 von 2,26 Prozentpunkten der Leitungsverluste auf den Einspeisekreis (Van Tichelen u. a. 2013, Tab. 1-8, S. 54); angesetzt sind deshalb 70 Prozent bei zentraler bis 90 Prozent bei dezentraler Aufstellung des Zuschlags aus Leistungsfaktor und Oberschwingungen. Der Zuschlag aus der Schiefast wirkt über die Spannung auf jeden Motor.

ZUSCHLAG IN PROZENT DES JAHRESVERBRAUCHS	AUSGANGSLAGE	NACH KLASSISCHER ANLAGE	NACH AKTIVER ANLAGE
Alte Installation: Leistungsfaktor und Oberschwingungen	8,7 % (λ 0,60)	2,4 % (λ 0,82)	0,1 % (λ 0,99)
Alte Installation: Schiefast	1,1 %	1,1 %	ausgeglichen
Moderne Installation: Leistungsfaktor und Oberschwingungen	3,5 % (λ 0,60)	1,0 % (λ 0,82)	unter 0,1 % (λ 0,99)

ZUSCHLAG IN PROZENT DES JAHRESVERBRAUCHS	AUSGANGSLAGE	NACH KLASSISCHER ANLAGE	NACH AKTIVER ANLAGE
Moderne Installation: Schiefast	1,1 %	1,1 %	ausgeglichen

Aus der Senkung der Zuschläge und dem erreichbaren Anteil ergibt sich die Einsparung in Prozentpunkten des Jahresverbrauchs (eigene Rechnung):



Erreichbare Einsparung in Prozentpunkten des Jahresverbrauchs: heller Teil bis zur modernen, kurzen Installation bei zentraler Aufstellung, dunkler Teil weiter bis zur alten, weitläufigen Installation bei dezentraler Aufstellung. Bei der aktiven Anlage sind die Verluste in Neutralleiter, Transformator und Motoren eingerechnet, für die moderne Installation anteilig zum Grundverlust. Eigene Rechnung mit den Annahmen aus dem Kasten oben.

In der alten Installation holt die klassische Technik den größeren Teil des Zuschlags aus dem Leistungsfaktor - das ist ihr legitimer Nutzen. Die aktive Anlage holt zusätzlich den Anteil der Oberschwingungen, der nach der Kondensatoranlage stehen bleibt, und die Schiefast: zusammen rund 3 Prozentpunkte, mit den drei weiteren Posten aus dem nächsten Abschnitt rund 4 bis 7. In der modernen, kurzen Installation fällt jeder Zuschlag kleiner aus, weil der Grundverlust kleiner ist: Die klassische Technik holt dort rund 2 Prozentpunkte, die aktive Anlage rund 4 bis 6. Über die Größenordnung entscheidet damit der Zustand der Installation, nicht die Technik allein.

Eine unabhängige Gegenprobe liefert die Industriestudie von Carnovale und Hronek (2010, S. 10, Tab. 2), die Einsparversprechen der Branche gegen realistische Werte stellt. Für die Leistungsfaktorkorrektur setzt sie typisch 0,5 bis 2 Prozent an, ausdrücklich ohne Oberschwingungen; für passive und aktive Oberschwingungsfilter 0,5 bis 8 Prozent je nach Einbauort, zuzüglich der Einsparung aus dem Leistungsfaktor; für Maßnahmen gegen Gegensystemströme meist unter 2 Prozent. Die Rechnung oben liegt in diesem Rahmen. Die klassische Anlage der alten Installation übersteigt die typischen 2 Prozent, weil sie mit einem sehr schlechten Verschiebungsfaktor gerechnet ist.

Drei weitere Posten

Drei Posten erfasst der Rechenweg über den Gesamtleistungsfaktor nicht, und alle drei entstehen aus Oberschwingungen und Schiefast. Der Neutralleiter führt die durch drei teilbaren Oberschwingungen und die Rückströme der Unsymmetrie und kann rechnerisch das 1,61-Fache

des Außenleiterstroms erreichen (Desmet und Baggini 2003); das Kabelmodell der Ecodesign-Vorstudie setzt ihn dagegen stromlos an (Van Tichelen u. a. 2013, S. 53). Die Wirbelstromverluste im Transformator wachsen mit dem Quadrat der Ordnungszahl, für ein Sechspuls-Spektrum mit einem K-Faktor von 8,35; an zwei vermessenen Transformatoren stiegen die Zusatzverluste mit verzerrtem Strom auf das 1,7- und das 2,5-Fache (Desmet und Delaere 2005, Tab. 1 und 2). Motoren verlieren beim höchsten zulässigen Oberschwingungsgehalt der Versorgungsspannung zusätzlich 0,11 bis 0,19 Prozent ihrer Bemessungsleistung (Kostić 2012, S. 150). Für die alte Installation ergeben diese Posten zusammen 1,7 bis 3,6 Prozentpunkte (eigene Rechnung); mit ihnen kommt die aktive Anlage im Beispiel auf rund 9 bis 12 Prozentpunkte. Eine verdrosselte Kondensatoranlage nimmt je nach Abstimmung einen Teil der Oberschwingungsströme auf (TDK Electronics 2025, S. 147); gezielt ausgeglichen werden diese Anteile nur von der aktiven Technik. Auch diese Rechnung ist eine Untergrenze: Schlechte Klemmstellen, Teillast und ältere Transformatoren enthält sie nicht. In ESO-Referenzbetrieben wurden auf Abrechnungsbasis 9 bis 21 Prozent gemessen, im Mittel aus zwölf Belegen 12,4 Prozent, im Median 11,0 Prozent. Die oberen Werte stammen aus durchsatznormierten Vergleichen, etwa je Waschvorgang oder je getanktem Liter; unmittelbar auf den Gesamtverbrauch bezogen liegt die Spanne bei 9 bis 13 Prozent, im Mittel bei 10,8 Prozent (ESO Elektronische Stromoptimierung o. J.).

Was das für Betriebe mit vorhandener Kompensationsanlage bedeutet

Wer bereits eine Kompensationsanlage betreibt, steht nicht vor der Frage „entweder - oder“, sondern vor der Frage, was danach noch zu holen ist. Im Beispiel der alten Installation sind das rund 3 Prozentpunkte aus Oberschwingungen und Schiefast und 1,7 bis 3,6 Prozentpunkte aus Neutralleiter, Transformator und Motoren, zusammen rund 4 bis 7 Prozentpunkte. Wenig bleibt nur dort, wo alle drei Bedingungen zugleich erfüllt sind: Der Verschiebungsfaktor ist bereits gut, die Last ist gleichmäßig über die Außenleiter verteilt, und es arbeitet kaum Leistungselektronik.

Für das Zusammenspiel gilt: Im selben Verteilnetz darf neben der aktiven Anlage keine verdrosselte Kompensationsanlage in Betrieb bleiben, weil sich beide Regelungen beeinflussen können; eine unverdrosselte Bestandsanlage kann weiterlaufen, wenn sie im Messbereich des Rogowski-Spulensatzes liegt (Technische Dokumentation der ESO-Anlage 2026). Da Kondensatoranlagen heute typischerweise verdrosselt ausgeführt werden (Brückl und Haslbeck 2013, S. 11), tritt die aktive Anlage in der Regel an die Stelle der Bestandsanlage.

Häufige Einwände aus der Fachdiskussion

EINWAND	ANTWORT	BELEG
„Kompensation spart keine Kilowattstunden.“	Die Stromwärmeverluste hinter dem Zähler sinken mit dem Quadrat des Stroms, und der Zähler rechnet sie als Wirkarbeit ab. Die Wirkung reicht aber nur bis zur Einbaustelle.	ABB 2008, S. 6; McCoy und Douglass 2014, S. 9-11
„Die Netzverluste liegen bei 1 bis 4 Prozent, mehr kann keine Anlage sparen.“	Für die Verteilverluste richtig. Hinzu kommen die Zusatzverluste in Motoren durch Schiefast, die in keiner Verteilverluststatistik auftauchen.	Carnovale und Hronek 2010, S. 2; U.S. DOE 2012
„Unsere Kompensationsanlage regelt schon auf 0,95.“	Sie korrigiert die Verschiebung der Grundschwingung. Oberschwingungen und Schiefast bleiben; im Rechenbeispiel stehen danach noch 2,4 Prozentpunkte Zuschlag aus Leistungsfaktor und Oberschwingungen, davon 1,9 allein aus Oberschwingungen, und 1,1 aus Schiefast. Die aktive Anlage senkt den ersten auf 0,1 und gleicht den zweiten aus.	Brückl und Haslbeck 2013, S. 9; eigene Rechnung
„Oberschwingungen kosten kaum Energie.“	Sie erhöhen den Effektivstrom wie jeder nicht wirksame Anteil; im Transformator wachsen die Wirbelstromverluste zusätzlich mit dem Quadrat der Ordnungszahl.	Desmet und Delaere 2005, Tab. 2
„Eine aktive Anlage gerät ebenso in Resonanz.“	Im geregelten Bereich ist sie eine Stromquelle mit hoher Ausgangsimpedanz, kein Kondensator; ein Parallelschwingkreis entsteht nicht.	Technische Dokumentation der ESO-Anlage 2026
„Thyristorgeschaltete Anlagen sind doch auch schnell.“	Sie umgehen die Schaltpause, bleiben aber gestufte Kondensatoranlagen - ohne Ausgleich von Oberschwingungen und Schiefast.	ABB 2008, S. 35; Brückl und Haslbeck 2013, Tab. 1

Beide Techniken im Vergleich

KRITERIUM	KLASSISCHE KOMPENSATIONSANLAGE	AKTIVE ANLAGE (ESO)
Wirkprinzip	Kondensatorstufen, über Schütze oder Thyristoren geschaltet	geregelter Stromquelle, Leistungshalbleiter mit bis zu 25,6 kHz getaktet

KRITERIUM	KLASSISCHE KOMPENSATIONSANLAGE	AKTIVE ANLAGE (ESO)
Regelung	in Stufen; dazwischen Über- oder Unterkompensation	stufenlos, Leistungsfaktor mindestens 0,99
Richtung	nur für induktive Lasten	induktiv und kapazitiv
Reaktionszeit	schützgeschaltet Entladepause im Bereich einer Minute je Stufe; thyristorgeschaltet schneller	höchstens 5 ms; Oberschwingungen in wenigen Netzperioden
Oberschwingungen	nicht gezielt; verdrosselt teilweise aufgenommen, unverdrosselt Gefahr der Verstärkung	Ordnungen 2 bis 13, Stromverzerrung höchstens 5 %
Schiefast	nicht ausgeglichen	Unsymmetrie höchstens 5 %, Neutralleiter entlastet
Resonanz	Schwingkreis mit dem Netz, Verdrosselung nötig	kein Schwingkreis, keine Verdrosselung
Verschleiß	Schütze und Kondensatoren altern mit den Schaltspielen	keine mechanischen Schaltvorgänge im Leistungspfad
Einsparung	gerechnet 4 bis 6 Prozentpunkte in einer alten Installation	gemessen im Mittel 12,4 Prozent (9 bis 21 Prozent); gerechnet rund 9 bis 12 Prozentpunkte in einer alten Installation

Fazit

Klassische Kompensationsanlagen sind kein Fehlkauf: Sie verbessern den Verschiebungsfaktor zuverlässig und senken die Stromwärmeverluste vor ihrer Einbaustelle. Gebaut sind sie für ein Netz, in dem der nicht wirksame Strom vor allem aus Motoren stammt. In heutigen Betrieben mit Umrichtern, Netzteilen und ungleich belasteten Außenleitern endet ihre Wirkung dort, wo Oberschwingungen und Schiefast beginnen - und ihre Kondensatoren bilden mit dem Netz Schwingkreise, die erst eine Verdrosselung beherrschbar macht.

Die aktive dynamische Strom- und Netzoptimierungsanlage setzt an allen drei Störfaktoren zugleich an. Sie senkt den Stromverbrauch um bis zu 15 Prozent des Jahresverbrauchs - in den Referenzbetrieben im Mittel um 12,4 Prozent -, weil die Stromwärmeverluste in Kabeln, Schaltanlage, Transformator und Neutralleiter mit dem Quadrat des Stroms sinken und Motoren ohne Schiefast mit besserem Wirkungsgrad laufen. Sie verbessert die Netzqualität im gesamten Betriebsnetz. Sie schont die Maschinen, die kühler laufen und langsamer altern. Jede

eingesparte Kilowattstunde senkt den CO₂-Ausstoß. Und weil sie modular und dezentral aufgebaut ist, lässt sie sich an der Hauptverteilung ebenso einsetzen wie an Unterverteilungen - ohne Eingriff in Maschinen oder Prozesse.

Wie viel davon ein einzelner Betrieb erreicht, hängt vom Zustand seiner Installation ab. Ausgelegt wird aus den vorhandenen Daten - Jahresverbrauch, Lastprofil und Anteil induktiver Lasten -, ohne vorgeschaltete Messkampagne.

Quellenverzeichnis

- ABB (2008): Power factor correction and harmonic filtering in electrical plants. Technical Application Papers No. 8, 1SDC007107G0201. Bergamo: ABB SACE.
- ABB (2015): Power factor improvement. Application guide, Low Voltage Products. ABB Inc.
- Brückl, O. und Haslbeck, M. (2013): Beitrag industrieller Blindleistungs-Kompensationsanlagen und -Verbraucher für ein innovatives Blindleistungs-Management in der Stromversorgung Deutschlands. Studie im Auftrag des ZVEI, Fachverband Starkstromkondensatoren. Frankfurt am Main: ZVEI.
- Carnovale, D. J. und Hronek, T. J. (2010): Power Quality Solutions and Energy Savings - What is Real? Industry Application IA02704001E. Cleveland, OH: Eaton Corporation.
- Desmet, J. und Baggini, A. (2003): Neutral Sizing in Harmonic Rich Installations. Power Quality Application Guide 3.5.1. Brüssel: European Copper Institute / Leonardo Power Quality Initiative.
- Desmet, J. und Delaere, G. (2005): Harmonics - Selection and Rating of Transformers. Power Quality Application Guide 3.5.2. Brüssel: European Copper Institute / Leonardo Power Quality Initiative.
- ESO Elektronische Stromoptimierung (o. J.): Auszug der Referenzen und Funktionsnachweise (Kundenangaben). Bruchsal: ESO.
- Europäische Kommission (2014): Verordnung (EU) Nr. 548/2014 der Kommission vom 21. Mai 2014 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG hinsichtlich Klein-, Mittel- und Großleistungstransformatoren, Anhang I. In der Fassung der Verordnung (EU) 2019/1783 der Kommission vom 1. Oktober 2019. Brüssel: Amtsblatt der Europäischen Union.
- IEA 4E EMSA (2025): Electric Motor Systems: Why Are They Important? Energy Efficiency Policy Brief #9. Paris: International Energy Agency, 4E Electric Motor Systems Annex.
- Kostić, M. (2012): Effects of Voltage Quality on Induction Motors' Efficient Energy Usage. In: Induction Motors - Modelling and Control, Kapitel 5. Rijeka: InTech. DOI: 10.5772/51223.
- McCoy, G. A. und Douglass, J. G. (2014): Continuous Energy Improvement in Motor Driven Systems. A Guidebook for Industry. Olympia, WA: Washington State University Energy Program, für U.S. Department of Energy, Advanced Manufacturing Office.
- Pană, A. (2011): Active Load Balancing in a Three-Phase Network by Reactive Power Compensation. In: Zobaa, A. (Hrsg.): Power Quality - Monitoring, Analysis and Enhancement, Kapitel 11. Rijeka: InTech. ISBN 978-953-307-330-9.
- TDK Electronics (2015): Film Capacitors - Power Factor Correction. Installation and maintenance instructions for PFC capacitors (PhaseCap, PhiCap). TDK Electronics AG.
- TDK Electronics (2025): Power Quality Solutions. Product Profile 2025. TDK Electronics AG.
- Technische Dokumentation der ESO-Anlage (2026): Werksunterlagen und Prüfberichte TLJS25091875936 und TEJS25091875937, bei ESO Elektronische Stromoptimierung hinterlegt.
- U.S. DOE (2012): Eliminate Voltage Unbalance. Motor Systems Tip Sheet #7, DOE/GO-102012-3733. Washington, DC: U.S. Department of Energy.
- Van Tichelen, P., Ectors, D., Stevens, M., Lam, W. C. und Peeters, K. (2013): Preparatory Studies for Product Group in the Ecodesign Working Plan 2012-2014: Lot 8 - Power Cables. Task 1-7 Report. Mol: VITO, im Auftrag der Europäischen Kommission, DG ENTR.