

Spannungsreduktion versus aktive Kompensation

Warum Spannungsabsenkung im produzierenden Gewerbe Risiken
schafft - und Netzqualität der wirksame Hebel ist

Technischer Bericht (Whitepaper)

Worum es in diesem Whitepaper geht

Zur Senkung betrieblicher Stromkosten konkurrieren zwei technologisch grundverschiedene Ansätze. Die Spannungsreduktion setzt am Energie-Input an: Ein Transformator senkt die gelieferte Netzspannung auf einen niedrigeren, noch normkonformen Wert. Die aktive Netzqualitätsoptimierung setzt an der Nutzung an: Sie lässt die Spannung auf Sollniveau und beseitigt die Störanteile im Strom - den nicht wirksamen Stromanteil, Oberschwingungen, Schiefast -, die im eigenen Netz Verluste erzeugen. Dieses Whitepaper vergleicht beide Ansätze für das produzierende Gewerbe, dessen Lastprofil von Drehstrommotoren und Leistungselektronik geprägt ist - und zeigt mit geprüften Quellen, warum die Spannungsabsenkung dort ein Risiko ist und die Netzqualität der wirksame Hebel.

Wie Spannungsreduktion spart - und für wen

Die Logik der Spannungsreduktion ist schnell erklärt. Netzbetreiber dürfen die Spannung am Übergabepunkt in einem Band von ± 10 Prozent um die Nennspannung liefern (CENELEC 2022); häufig liegt sie im oberen Bereich. Eine Spannungsoptimierungsanlage - im Kern ein Transformator - senkt die Eingangsspannung auf einen niedrigeren, noch normkonformen Wert. Bei Lasten mit konstanter Impedanz, etwa Heizelementen und konventioneller Beleuchtung, sinkt die Leistungsaufnahme dann quadratisch mit der Spannung:

$$P = \frac{U^2}{R}$$

Genau hier liegt aber auch der Charakter dieser „Einsparung“: Die größte systematische Untersuchung zur Spannungsabsenkung kommt zum Ergebnis, dass 98 bis 99 Prozent der Energieänderung bei den Endverbrauchern selbst entstehen - Lampen leuchten schwächer, Heizungen heizen weniger - und nur 1 bis 2 Prozent auf reduzierte Verluste entfallen (Schneider u. a. 2010, Abschn. 3, zu Abbildung 3.16). Spannungsreduktion spart also überwiegend, indem sie die Leistung der Verbraucher drosselt. Wo diese Drosselung keinen Nutzen kostet - etwa bei übertensorgter Altbeleuchtung -, ist das legitim: Für Bürogebäude, Handel oder Hotellerie mit hohem Beleuchtungsanteil beschreibt die Anwendungsregel VDE-AR-E 2055-1 ein Berechnungsverfahren für solche Potenziale (DKE 2016b). Elektronisch geregelte Verbraucher entziehen sich dem Prinzip ohnehin: Konstantleistungslasten wie Umrichter und Netzteile ziehen bei sinkender Spannung einfach mehr Strom (Gorjian u. a. 2023).

Abgrenzung: Steckdosen-„Sparboxen“

Von den gewerblichen Spannungsoptimierungsanlagen zu unterscheiden sind steckbare „Stromsparboxen“ für Haushalte. Für diese Geräteklasse kommen die Bundesnetzagentur und die Verbraucherzentralen zum selben Ergebnis: Die Bundesnetzagentur bezeichnet die Energiespareffekte solcher Geräte nach dem Stand der Technik als fragwürdig, stellte bei geprüften Exemplaren unfachmännisch angeschlossene Bauteile und fehlende Lötverbindungen fest und identifizierte 2022 allein im Onlinehandel 353 Angebote nicht konformer Energiesparboxen, deren Betrieb in Deutschland unzulässig ist (Bundesnetzagentur 2022); die Verbraucherzentrale spricht von Steckdosengeräten ohne Spareffekt (Verbraucherzentrale o. J.).

Warum Motoren das Konzept umkehren

Das Lastprofil des produzierenden Gewerbes wird von Drehstrom-Asynchronmotoren dominiert - und die verhalten sich nicht wie Widerstände. Eine Pumpe muss ihr Volumen fördern, ein Förderband seine Last bewegen: Der Motor muss eine näherungsweise **konstante mechanische Leistung** abgeben, unabhängig von der Versorgungsspannung. Sinkt die Spannung, beginnt eine physikalisch zwingende Kette. Zuerst bricht das Drehmoment ein, denn es hängt quadratisch von der Spannung ab:

$$M \propto U^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{M(0,9 U_N)}{M(U_N)} = 0,9^2 = 0,81$$

Zehn Prozent weniger Spannung bedeuten rund 19 Prozent weniger Anlauf- und Kippmoment. Weil die Last dieselbe bleibt, kompensiert der Motor mit mehr Strom - und die Wicklungsverluste steigen quadratisch mit diesem Strom ($P = I^2 \cdot R$). Die Folgen sind gemessen und tabelliert (Bonnett und Boteler 2001, Tab. 2):

PARAMETER BEI 90% NENNSPANNUNG	VERÄNDERUNG	FOLGE
Anlauf- und Kippmoment	-19 %	Anlaufprobleme, Blockiergefahr bei Lastspitzen
Volllaststrom	+11 %	höhere I^2R -Verluste, Auslösen von Schutzorganen
Übertemperatur der Wicklung	+23 %	beschleunigte Isolationsalterung
Wirkungsgrad	-1 bis -2 Punkte	Mehrverbrauch statt Einsparung
Schlupf	+23 %	Drehzahl- und Prozessschwankungen

Die erhöhte Temperatur ist dabei der teuerste Posten, denn für die Wicklungsisolierung gilt die 10-Kelvin-Regel: Pro 10 Kelvin höherer Dauertemperatur halbiert sich ihre erwartete Lebensdauer (Bonnett und Boteler 2001, S. 305; normativ IEC 60034-18-31:2012, Abschn. 5.2):

$$L \approx L_0 \cdot 2^{-\Delta T/10 \text{ K}}$$

Ein Motor, der durch Unterspannung dauerhaft 10 bis 20 Kelvin wärmer läuft, verliert damit rechnerisch die Hälfte bis drei Viertel seiner Isolationslebensdauer. Zugleich zeigt die Messtechnik des U.S. Department of Energy: Der Wirkungsgrad eines Motors ist zwischen Nennspannung und etwa 10 Prozent Überspannung am höchsten - Unterspannung führt vom Optimum weg (U.S. DOE 2012b). Für Motoren gibt es durch Spannungsabsenkung schlicht nichts zu holen; es gibt etwas zu verlieren.

Befürworter verweisen gern darauf, dass Motoren nach IEC 60034-1 beziehungsweise NEMA MG-1 für ± 10 Prozent Spannungsabweichung ausgelegt sind. Das ist richtig - und genau falsch verstanden: Diese Toleranz definiert den Bereich, in dem der Motor funktionsfähig bleibt (Zone A), nicht den Bereich effizienten Betriebs. Die Normen selbst halten fest, dass der Betrieb abseits der Bemessungsspannung zu abweichenden Kennwerten und erhöhter Erwärmung führt (IEC 2022b; NEMA 2018). Die Toleranz ist für unvermeidbare Netzschwankungen gedacht - nicht als Freibrief, den Arbeitspunkt dauerhaft an den Rand zu legen.

Umrichter und Steuerungen

Frequenzumrichter richten die Netzspannung in einen Gleichspannungs-Zwischenkreis; dessen Niveau folgt der Eingangsspannung. Eine abgesenkte Versorgung reduziert die verfügbare Ausgangsspannung des Umrichters, kann seine Leistung begrenzen und lässt ihn näher an der Unterspannungs-Abschaltsschwelle arbeiten - jede zusätzliche Netzschwankung endet dann schneller in einer Störmeldung. Elektronische Steuerungen verhalten sich als Konstantleistungslasten und ziehen bei Unterspannung mehr Strom (Gorjian u. a. 2023). Eine Einsparung entsteht in beiden Fällen nicht.

Der andere Weg: Netzqualität statt Spannungsabsenkung

Die aktive dynamische Stromoptimierung lässt die Spannung unangetastet auf Sollniveau und setzt dort an, wo die Verluste tatsächlich entstehen: beim Strom.

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

Die Anlage misst den Laststrom über einen Rogowski-Spulensatz, zerlegt ihn in Wirkanteil, nicht wirksamen Stromanteil, Verzerrungs- und Unsymmetrieannteil und speist die unerwünschten Anteile gegenphasig ein - stufenlos, induktiv wie kapazitiv, innerhalb von höchstens fünf Millisekunden. Nach der technischen Dokumentation des Leistungsteils erreicht sie am Messpunkt einen Leistungsfaktor von mindestens 0,99, eine Stromverzerrung von höchstens 5 Prozent und eine Stromunsymmetrie von höchstens 5 Prozent; gefiltert wird die 2. bis 13. Ordnung (Technische Dokumentation des Leistungsteils 2026). Der Effektivstrom in Kabeln, Schaltanlage und Transformator sinkt - und mit ihm sinken die Stromwärmeverluste quadratisch, die Wirbelstromverluste des Transformators und die Belastung des Neutralleiters. Die vollständige Herleitung samt belegter Größenordnungen steht im Whitepaper ESO-WP-2026-03.

Der Unterschied zur Spannungsreduktion ist grundsätzlich: Die Verbraucher erhalten weiterhin ihre volle Nennspannung und damit ihre volle Leistungsfähigkeit - Drehmoment, Drehzahl und Prozessqualität bleiben unangetastet. Gespart wird nicht am Nutzen der Maschinen, sondern an den Verlusten und der thermischen Belastung der eigenen Infrastruktur. Damit dreht sich die 10-Kelvin-Regel um: Was bei Unterspannung Lebensdauer kostet, gewinnen kühlere Betriebsmittel zurück - die aktive Stromoptimierung ist zugleich eine Lebensdauermaßnahme für Motoren, Kabel und Transformator. Zu einer ehrlichen Darstellung gehören auch hier die Grenzen: Die Anlage hat einen Eigenverbrauch von 0,1 kW in Bereitschaft bis 1,0 kW bei Vollast (Werksmessung), ersetzt keinen Überspannungsschutz und keine Netzdimensionierung, und pauschale Einsparprozent gibt es nicht - garantiert werden 5 Prozent bezogen auf die im Angebot angesetzte induktive Last; alles darüber ist eine Frage des konkreten Lastprofils und wird gemessen, nicht versprochen.

Referenzen aus der Praxis

Betreiber berichten nach der Installation Verbrauchsrückgänge auf Basis ihrer eigenen Abrechnungen - es handelt sich um Eigenangaben der Kunden, nicht um unabhängig kontrollierte Messreihen (weiteres unter eso-anlage.de/fallstudien):

BETRIEB	BRANCHE	BERICHTETE EINSPARUNG
Tankstellenbetrieb	Handel/Tankstelle	ca. 21,6 % (Funktionsnachweis Standort Bad Kreuznach)
Planet CarWash GmbH	Waschstraße	ca. 16,5 % je Fahrzeugwäsche
Werner Bräunling GmbH	Metzgerei	ca. 13 %
Geiger Sondermaschinenbau GmbH	Metallverarbeitung	ca. 12 %

„Unabhängig der hohen Einsparung ist mir mit Einbau/Installation der ESO aufgefallen, dass ich keine technischen Störungen mehr in meinen Anlagen hatte, welche ohne ESO hin und wieder durch Spannungsschwankungen aufgetreten sind.“ - Markus Meier, Geschäftsführer Planet CarWash GmbH

Gerade die zweite Beobachtung - der Rückgang der Störungen - ist technisch aufschlussreich: Sie ist genau das, was der Netzqualitätsmechanismus vorhersagt, und ein Effekt, den eine Spannungsabsenkung nicht liefern kann.

Synoptischer Vergleich

KRITERIUM	SPANNUNGSREDUKTION	AKTIVE DYNAMISCHE OPTIMIERUNG (ESO)
Wirkprinzip	senkt die zugeführte Spannung auf einen niedrigeren Festwert	Spannung bleibt auf Sollniveau; nicht wirksame Stromanteile sowie Verzerrungs- und Unsymmetrieströme werden gegenphasig ausgeglichen
Woher die Einsparung kommt	zu 98-99 % aus gedrosselter Leistungsaufnahme der Verbraucher (Schneider u. a. 2010)	aus reduzierten I ² R- und Wirbelstromverlusten der eigenen Installation
Passendes Lastprofil	spannungsabhängige Lasten: Altbeleuchtung, Heizelemente (Büro, Handel, Hotellerie)	motor- und umrichtergeprägte Lasten des produzierenden Gewerbes
Wirkung auf Motoren	Drehmoment -19 % bei 90 % Spannung, Strom +11 %, Übertemperatur +23 % (Bonnett und Boteler 2001)	volle Nennspannung; kühlere Betriebsmittel durch weniger Effektivstrom
Anlagenlebensdauer	verkürzt: 10-K-Regel wirkt gegen den Motor	verlängert: 10-K-Regel wirkt für den Motor
Produktionsrisiko	Blockiergefahr bei Lastspitzen, Umrichter näher an der Abschaltswelle	keine Eingriffe in die Versorgung; Störungsrückgang in Referenzbetrieben berichtet

Fazit und Handlungsempfehlung

Spannungsreduktion ist keine Scharlatanerie - sie ist ein Werkzeug für ein bestimmtes Lastprofil, das im produzierenden Gewerbe nicht vorliegt. Wo Motoren, Umrichter und geregelte Elektronik dominieren, spart die Absenkung fast nichts (die Verbraucher holen sich ihre Leistung über mehr Strom zurück), erhöht aber Erwärmung, Verschleiß und Ausfallrisiko. Die Zahlen dazu sind seit Jahrzehnten publiziert und in diesem Bericht mit Fundstellen belegt.

Für das produzierende Gewerbe ist der wirksame und risikofreie Hebel die Netzqualität: den nicht wirksamen Stromanteil, Oberschwingungen und Schiefelast dort kompensieren, wo sie entstehen - bei voller Nennspannung. Die Entscheidungsgrundlage liefert keine Broschüre, sondern die Stromdaten des Betriebs selbst: Jahresverbrauch, Lastprofil und Anteil induktiver Lasten zeigen zusammen mit branchenspezifischen Vergleichswerten, welcher Mechanismus welchen Beitrag leisten kann. Eine vorgeschaltete Messkampagne ist dafür nicht nötig - sie würde den Preis erhöhen, die Auslegung aber nicht verändern; die Anlage wird mit Reserve ausgelegt und regelt selbsttätig auf den Bedarf.

Quellenverzeichnis

- Bonnett, A. H. und Boteler, R. (2001): The Impact That Voltage Variations Have on AC Induction Motor Performance. In: Proceedings of the 2001 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Industry, Panel 2. Washington, DC: ACEEE.
- 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. Frankfurt am Main: ZVEI.
- Bundesnetzagentur (2022): Bundesnetzagentur warnt vor vermeintlichen Energiespargeräten im Onlinehandel. Pressemitteilung vom 25.11.2022. Bonn: Bundesnetzagentur.
- CENELEC (2022): EN 50160:2022 - Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen (mit Änderung A1:2025). Brüssel: CENELEC.
- DKE (2016a): DIN VDE 0100-443:2016-10 und DIN VDE 0100-534:2016-10 - Schutz bei transienten Überspannungen. Berlin: VDE Verlag.
- DKE (2016b): VDE-AR-E 2055-1 - Energieeffizienz durch Spannungsoptimierungsanlagen in Niederspannungsanlagen; Berechnungsverfahren. Berlin: VDE Verlag.
- Gorjian, A., Eskandari, M. und Moradi, M. H. (2023): Conservation Voltage Reduction in Modern Power Systems. In: Energies 16(5), 2502. DOI: 10.3390/en16052502.
- Technische Dokumentation des Leistungsteils (2026): Betriebsanleitung Static Var Generator, 500-V-Serie, Version V202506, sowie Prüfberichte TLJS25091875936 und TEJS25091875937. Bei ESO Elektronische Stromoptimierung hinterlegt.
- IEC (2022b): IEC 60034-1 - Drehende elektrische Maschinen, Teil 1: Bemessung und Betriebsverhalten (Spannungs-/Frequenzabweichungen, Zone A/B). Genf: IEC.
- NEMA (2018): ANSI/NEMA MG 1-2016 (R2018) - Motors and Generators. Rosslyn, VA: NEMA.
- Schneider, K. P., Tuffner, F. K., Fuller, J. C. und Singh, R. (2010): Evaluation of Conservation Voltage Reduction (CVR) on a National Level. Report PNNL-19596. Richland, WA: Pacific Northwest National Laboratory.
- U.S. DOE (2012b): Improve Motor Operation at Off-Design Voltages. Motor Systems Tip Sheet #9, DOE/GO-102012-3736. Washington, DC: U.S. Department of Energy.
- Verbraucherzentrale (o. J.): Stromsparboxen und Heizlüfter für Steckdosen ohne Spareffekt. Online: verbraucherzentrale.de (abgerufen am 09.09.2026).
- ESO Elektronische Stromoptimierung (2026): Verluste im Unternehmensnetz. Technisches Whitepaper ESO-WP-2026-03, V2.0.
- ESO Elektronische Stromoptimierung (o. J.): Auszug der Referenzen und Funktionsnachweise (Kundenangaben). Bruchsal: ESO.