



Verborgene Stromfresser: Mehrverbrauch durch Oberschwingungen, Leistungsfaktor, Spannungsschwankungen und Transienten

Technisches Whitepaper

ESO Elektronische Stromoptimierung

Inhaber Michael Grün

August 2025

Inhaltsverzeichnis

1	Oberschwingungen: Verzerrte Stromwellen und ihre Verluste	3
1.1	Mehrverbrauch durch Oberschwingungen	3
2	Schlechter Leistungsfaktor (Blindströme) und I^2R-Verluste	4
2.1	Mehrverbrauch durch Blindströme	4
3	Spannungsschwankungen und Unsymmetrien: Versteckte Effizienzbrem- sen	5
3.1	Phasenunsymmetrie bei Drehstrommotoren	5
3.2	Mehrverbrauch durch Spannungsqualität	6
4	Transienten (Schalt- und Stoßimpulse): Kurz, aber folgenschwer	6
4.1	Mehrverbrauch durch Transienten	7
5	Quantifizierung der Mehrverbräuche in der Übersicht	7
5.1	Fallbeispiele und Studien	7
6	Diskussion: Häufigkeit der Störfaktoren in KMU	8
6.1	Blindleistung/Leistungsfaktor-Probleme	8
6.2	Oberschwingungen	8
6.3	Spannungsschwankungen	9
6.4	Transienten	9
7	Dynamische Stromoptimierungsanlage zur Verlustreduzierung	9
7.1	Wirkungsweise und Beispiel	10
7.2	Einsparpotenzial	11
8	Fazit	11

Einleitung

Steigende Stromkosten und verschärfte Effizienzvorgaben zwingen Unternehmen dazu, jede Form von Energieverschwendung aufzudecken. Oft übersehen werden dabei versteckte Verluste im firmeneigenen Stromnetz – etwa durch Oberschwingungen, Blindströme, Spannungsschwankungen oder Transienten. Solche Netzstörungen führen zu erhöhten Verlustleistungen (z.B. Wärme in Leitungen, Trafos und Motoren) und können somit einen merklichen Mehrverbrauch an elektrischer Energie verursachen.

Das Ziel dieses Whitepapers ist es, diese Störfaktoren zu analysieren und quantifizierbar zu machen: Wie stark erhöhen sie typischerweise den kWh-Verbrauch? Jede Aussage wird mit anerkannten wissenschaftlichen Quellen (Fraunhofer-Institute, IEEE, VDE, Hochschulstudien etc.) belegt. Dabei richtet sich dieses Dokument primär an technische Leiter, Energiemanager in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU), aber auch die Geschäftsleitung, die einen Überblick über mögliche Einsparpotenziale erhalten möchten. Insbesondere sollen auch skeptische Leser abgeholt werden, die behaupten, Kompensationsanlagen brächten keine echten Einsparungen.

Im Folgenden werden die wichtigsten Netz-Störgrößen systematisch untersucht: Oberschwingungen, ein schlechter Leistungsfaktor (Blindströme), Spannungsschwankungen (inkl. Unsymmetrien) sowie Transienten (Störimpulse). Für jede Kategorie werden Ursachen, Auswirkungen auf Verluste und Anlagenverschleiß sowie typische Mehrverbräuche in Prozent angegeben. Anschließend wird diskutiert, welche dieser Probleme in KMU am häufigsten auftreten. Abschließend zeigt das Whitepaper eine Lösungsperspektive auf: wie eine moderne dynamische Stromoptimierungsanlage (ESO) in Echtzeit die Netzqualität verbessern und damit jährlich ca. 10–15% Energie einsparen kann – ohne Spannungsabsenkung, sondern durch aktive, ultraschnelle Blindleistungskompensation und Oberschwingungsfilterung.

1 Oberschwingungen: Verzernte Stromwellen und ihre Verluste

Oberschwingungen sind Strom- und Spannungsverzerrungen, die durch nichtlineare Verbraucher entstehen (z.B. Frequenzumrichter, USV-Anlagen, elektronische Vorschaltgeräte). Statt sinusförmigem Strom fließen verzernte Ströme mit höheren Frequenzanteilen (Vielfache der 50 Hz-Grundfrequenz).

Langfristig wirken Oberschwingungen vor allem thermisch: Sie verursachen erhöhte Erwärmung in elektrischen Anlagen und Netzkomponenten. Kabel und Transformatoren müssen die zusätzlichen harmonischen Ströme führen, was zu höheren Kupferverlusten (I^2R -Verluste) und zusätzlichen Eisenverlusten (Wirbelströme im Trafokern) führt. Die Folge sind höhere Verluste und kürzere Lebensdauer dieser Betriebsmittel.

Beispielsweise können in Transformatoren die Wirbelstromverluste stark ansteigen, da sie quadratisch mit der Frequenz zunehmen – bei hohem Oberschwingungsgehalt wird der Trafo heißer und oft darf er nicht mehr mit Nennlast betrieben werden. In Drehstrom-Netzen führen Oberschwingungen zudem zu Überlast im Neutralleiter: Alle Tripel-Oberschwingungen (3., 9., 15. Ordnung etc.) addieren sich im Neutralleiter und können dessen Strom auf das bis zu Dreifache eines Außenleiterstroms treiben. Dies erklärt, warum Anlagenbereiche mit vielen nichtlinearen Geräten (Rechenzentren, Antriebe mit Umrichtern usw.) oft unter heißen Neutralleitern oder Trafobrummen leiden.

1.1 Mehrverbrauch durch Oberschwingungen

Oberschwingungen leisten selbst keine Nutzarbeit, verursachen aber dennoch einen messbaren Mehrverbrauch an Wirkarbeit, da sie zusätzliche Wärmeverluste erzeugen. Studien beziffern den dadurch erhöhten Energieverbrauch typischerweise auf einige Prozent.

Zum Beispiel zeigte eine IEEE-Publikation von Key and Lai (1997), dass in einem Bürogebäude mit vielen elektronischen Verbrauchern bis zu 8% der aufgenommenen Wirkleistung allein als Verlustleistung durch Oberschwingungsströme „verheizt“ wurden. Anders ausgedrückt: In diesem Szenario gingen 8% der Energie zusätzlich verloren, weil harmonische Ströme die Leitungen und Transformatoren erwärmten.

In typischen Industrieanlagen mit moderatem Oberschwingungsgehalt ist der Effekt etwas geringer; verschiedene Quellen nennen ca. 2–5% Mehrverbrauch als grobe Richtgröße (Key and Lai, 1997; Harrison, 2010). Die Größenordnung hängt stark vom Verzerrungsgrad (THD) ab: Ein Total Harmonic Distortion von z.B. 10% in Strom und Spannung kann bereits mehrere Prozent Zusatzverluste verursachen.

Klar ist: Jede nennenswerte Oberschwingung verschlechtert den Leistungsfaktor und erhöht die effektive Stromstärke, wodurch I^2R -Verluste in Kabeln und Wicklungen drastisch steigen. Ein anschauliches Beispiel liefern Berechnungen des Fraunhofer IEE: Ein elektronisches Gerät mit Leistungsfaktor 0,4 (stark verzernter Strom) zieht 2,5-mal mehr Strom als ein ideales Gerät – die Wiring Losses in der Zuleitung steigen dadurch theoretisch um den Faktor 6,25 (Fraunhofer, 2019).

Obschon einzelne Kleingeräte wenig ausrichten, summieren sich solche Effekte in einem größeren Netz und erklären den Mehrverbrauch durch Oberschwingungen.

Neben dem reinen Energieverlust verursachen Oberschwingungen indirekt weitere Kosten: Durch Überhitzung verkürzt sich die Lebensdauer von Isolierungen, Motoren, Kondensatoren und anderen Komponenten erheblich. Geräte fallen schneller aus oder müssen überdimensioniert werden (z.B. K-Faktor-Trenntransformatoren für non-lineare Lasten).

Diese versteckten Folgekosten unterstreichen die Bedeutung, Oberschwingungen zu filtern oder gar nicht erst entstehen zu lassen.

2 Schlechter Leistungsfaktor (Blindströme) und I^2R -Verluste

Ein weiterer „Stromfresser“ im Netz ist ein schlechter Leistungsfaktor ($\cos \varphi$) aufgrund von Blindströmen. Induktive Verbraucher wie Motoren, Transformatoren oder Schweißgeräte beziehen neben Wirkleistung auch Blindleistung (VAr), die periodisch zwischen Quelle und Verbraucher pendelt. Dieser Blindstrom verrichtet keine Nutzarbeit, führt aber dazu, dass der Scheinstrom und damit die Gesamtbelastung der Leitungen und Trafos steigt (ZVEI, 2013).

Je niedriger der Leistungsfaktor, desto höher der Stromfluss für die gleiche Wirkleistung – was wiederum zu höheren Leitungsverlusten führt (Skalierung mit I^2R). So zieht z.B. eine Anlage mit $\cos \varphi = 0,7$ rund 43% mehr Strom als bei $\cos \varphi = 1,0$; die Kabelverluste (I^2) verdoppeln sich nahezu. Ein hoher Blindstromanteil belastet zudem Transformatoren unnötig, da diese nach Scheinleistung ausgelegt werden müssen.

Die Konsequenz sind Wärmeverluste, begrenzte Leistungsreserven und unter Umständen Spannungseinbrüche am Einspeisepunkt.

2.1 Mehrverbrauch durch Blindströme

Während Blindleistung an sich vom Zähler nicht als Wirkarbeit erfasst wird (kWh-Zähler messen nur Wirkleistung), erhöhen Blindströme indirekt den Energieverbrauch des Unternehmens durch höhere Netzverluste in der gesamten Anlage. Die Verluste in Leitungen und Trafos wachsen mit dem Quadrat des Stromes – und der ist bei schlechtem $\cos \varphi$ eben erhöht.

Eine Studie des ZVEI (2013) quantifizierte dieses Potenzial im großen Maßstab: Würden alle Betriebe in Deutschland ihren Leistungsfaktor von 0,90 auf 1,00 verbessern, ließe sich der Stromverlust im Verteilnetz um etwa 1,7 Terawattstunden pro Jahr reduzieren – rund 8% der gesamten Netzverluste (ZVEI, 2013). Dieser enorme Wert zeigt, wie viel Energie heute unnötig in den Leitungen verheizt wird, um Blindstrom zu transportieren.

Auf Ebene eines einzelnen Industriebetriebs sind die Relationen natürlich kleiner, aber dennoch signifikant. Untersuchungen zeigen, dass eine Kompensation auf $\cos \varphi \approx 0,95$ typischerweise 1–4% der bezogenen Wirkarbeit einsparen kann, allein durch reduzierte I^2R -Verluste im eigenen Netz (Carnovale et al., 2003).

In schlecht kompensierten Anlagen mit sehr niedrigem Leistungsfaktor (z.B. 0,5–0,8) kann der Mehrverbrauch auch höher ausfallen. Allerdings machen solche Leitungsverluste im Verhältnis zur gesamten Nutzenergie meist <10% aus, sodass die direkte Einsparung durch Blindleistungskompensation in vielen Fällen im niedrigen einstelligen Prozentbereich liegt.

Nichtsdestotrotz sind Blindströme unnötiger Ballast, der von fast allen Energieversorgern mit Gebühren belegt wird (Blindstromkosten) und die Infrastruktur belastet. Moderne dynamische Kompensationssysteme können Blindleistung genau dort bereitstellen, wo sie benötigt wird – nämlich nahe beim Verbraucher –, und so die Netzverluste um mehrere Prozent senken (ZVEI, 2013).

Neben der Energieeinsparung ergibt sich ein zusätzlicher Vorteil: Durch die Entlastung der Kabel und Trafos (weniger Strom, weniger Wärme) verlängert sich deren Lebensdauer und es stehen freie Leistungsreserven für zukünftige Erweiterungen zur Verfügung.

3 Spannungsschwankungen und Unsymmetrien: Versteckte Effizienzbremser

Schwankungen der Versorgungsspannung – seien es kurzzeitige Einbrüche/Überspannungen (Sags/Swells), dauerhafte Abweichungen vom Nennwert oder Phasenunsymmetrien – wirken sich direkt auf die Effizienz von Verbrauchern aus.

Viele Geräte sind für $\pm 10\%$ Spannungstoleranz ausgelegt, doch schon innerhalb dieses Bandes kann es zu Mehrverbrauch kommen: Überhöhte Spannung führt z.B. dazu, dass Beleuchtungsanlagen und Motoren mehr Leistung aufnehmen als nötig (Übererregung, Sättigung) (ABB, 2021). ABB berichtet, dass im Verteilnetz Überspannung zu unnötig hohem Energieverbrauch, zur Kernsättigung von Trafos und zu Isolationsstress führt.

Ein dauerhaft um nur $+5\%$ erhöhter Spannungspegel kann bei bestimmten Lasten (z.B. Leuchtstofflampen, Heizgeräten) den Verbrauch um ähnlich viele Prozent steigern – ohne Nutzen, aber mit verkürzter Lebensdauer der Geräte.

Umgekehrt hat Unterspannung ebenfalls ihren Preis: Zwar sinkt die von vielen Geräten aufgenommene Wirkleistung etwas, doch Elektromotoren liefern dann weniger Drehmoment und ziehen überproportional höhere Ströme, um die mechanische Last noch zu erfüllen. Dies führt zu erhöhter Kupferverlustleistung und starker Erwärmung – die Motoren laufen im ineffizienten Bereich, was die Motorwicklungen schneller altern lässt (S3 Energy, 2019; AllTestPro, 2020).

Kurzfristige Spannungseinbrüche (z.B. beim Anlauf großer Motoren oder durch Netzfehler) können zudem Produktionsunterbrechungen verursachen, was indirekt den Energieaufwand pro produzierter Einheit erhöht (Anlageneustarts, Ausschuss etc.).

3.1 Phasenunsymmetrie bei Drehstrommotoren

Besonders kritisch für Drehstrommotoren ist eine unsymmetrische Spannung (Phasenunsymmetrie). Schon ein geringer Spannungsunterschied zwischen den Phasen von z.B. $2\text{--}3\%$ kann hohe Ausgleichsströme im Motor verursachen und dessen Abgabeleistung sowie Wirkungsgrad reduzieren (PumpEd101, 2010; AllTestPro, 2020).

NEMA empfiehlt, ab $>1\%$ Unsymmetrie die Motorenleistung zu drosseln (Derating) – bei 3% Spannungsungleichheit darf ein Motor nur noch ca. 88% seiner Nennleistung aufnehmen, um Überhitzung zu vermeiden (PumpEd101, 2010). Evans (2010) berichtet, dass bei 3% Spannungsunsymmetrie der Wirkungsgrad eines Motors um etwa 2 Prozentpunkte sinkt.

Die erhöhten Verluste durch Unsymmetrie sind auf stark ungleiche Ströme in den Phasen zurückzuführen: Bereits 1% Spannungsungleichheit kann $6\text{--}10\%$ Stromungleichheit bewirken (AllTestPro, 2020), was die I^2R -Verluste erheblich steigert. Zusätzlich treten mechanische Schwingungen, Drehmomentpulsationen und ein höherer Schlupf auf, sodass der Motor weniger effizient arbeitet.

In der Praxis treten Spannungsunsymmetrien besonders in Betrieben mit vielen einphasigen Verbrauchern oder bei ungleich verteilten Lasten auf (z.B. Schweißgeräte, große Einzelphase-Motoren).

3.2 Mehrverbrauch durch Spannungsqualität

Spannungsschwankungen beeinflussen den Verbrauch oft indirekt. Zusammenfassend kann man sagen: Überspannung bewirkt in vielen Fällen unnötigen Mehrverbrauch (Geräte laufen „auf fetterer Spannungskurve“) und Unterspannung/Unsymmetrie bewirkt Ineffizienzen (Geräte laufen außerhalb optimaler Kennwerte, ziehen mehr Strom für gleiche Arbeit).

Genaue Prozentangaben hängen stark von der Art der Verbraucher ab. In Motorlastigen Betrieben führt eine 3–5% Unterspannung typischerweise zu einigen Prozent höheren Verlusten in den Motoren (und u.U. zu Produktionsleistungsabfall). Überspannungen von 5–10% können z.B. in der Beleuchtung oder in Kühlanlagen 5–10% Mehrverbrauch verursachen.

Phasenunsymmetrien im zulässigen Bereich ($<2\%$) verursachen oft $\ll 1\%$ Mehrverluste gesamt, sollten aber im Auge behalten werden, da sie lokal einzelne Motoren stark belasten.

Insgesamt sind Spannungsqualität und Effizienz eng verknüpft: Schon kleinste Abweichungen vom Idealwert können die Verlustleistung erhöhen.

4 Transienten (Schalt- und Stoßimpulse): Kurz, aber folgenschwer

Transienten sind kurze Spannungs- oder Stromstöße im Netz, typischerweise verursacht durch Schalthandlungen (z.B. Ein- und Ausschalten großer Verbraucher, Leistungsschalter) oder durch externe Einflüsse wie Blitzeinschläge. Sie dauern nur wenige Millisekunden bis Mikrosekunden, können aber sehr hohe Amplituden erreichen.

Obwohl Transienten zeitlich flüchtig sind, können sie spürbare Auswirkungen auf Verluste und Anlagenverschleiß haben. Jeder schnelle Spannungswechsel erzeugt auch schnelle Stromänderungen (di/dt), die in Motoren und Transformatoren temporäre Überspannungen und Wirbelströme hervorrufen.

Häufige transiente Überspannungen führen zu erhöhten Hystereseverlusten in Eisenkernen, was bedeutet, dass Motoren und Trafos mehr Strom aufnehmen, als für die eigentliche Nutzleistung nötig wäre (S3 Energy, 2019). S3 Energy (2019) beschreibt, dass Transientenspitzen die magnetischen Bauteile in einen ständigen leichten Wechsel aus Bremsen und Beschleunigen versetzen, was als „Mikro-Jogging“ bei Motoren beobachtet wurde.

Dieses Phänomen äußert sich in Vibration, Brummgeräuschen und Wärmeentwicklung, da der Motor ständig kleine Störausschläge kompensieren muss. Transienten erhöhen also effektiv den Betriebsstrom und damit die Verlustleistung – ähnlich wie ständiges leichtes Gasgeben und Bremsen bei einem Fahrzeug den Kraftstoffverbrauch erhöht.

Quantitativ sind diese Effekte schwierig zu bestimmen, da Transienten unregelmäßig auftreten. Bei häufigen Schaltvorgängen (z.B. Pressen, Aufzugsantriebe, Punktschweißanlagen) können die zusätzlichen Verluste durch Transienten aber durchaus einige Prozent der Energie ausmachen, die in Wärme „verpufft“.

Hinzu kommt: Transienten beschädigen langfristig die Isolierung und Elektronik. Sie verursachen Teilentladungen, Überspannungsstress und frühzeitige Alterung von Komponenten. So können z.B. Leistungselektronik-Module (VSDs, SPS-Steuerungen) durch wiederholte Überspannungsimpulse deutlich schneller ausfallen, was dann indirekt den Energieverbrauch erhöht (Ersatzteile, Wartung, ungeplante Stillstände).

4.1 Mehrverbrauch durch Transienten

Der direkte Mehrverbrauch durch Transienten lässt sich nicht als dauerhafter Prozentwert angeben – er resultiert aus der Summe vieler kleiner Energieimpulse. Ein transientes Ereignis enthält zwar nur wenig Energie, doch die Folgewirkungen (erwärmte Kerne, nachregelnde Verbraucher, leerlaufende Prozesse beim Störungsreset) summieren sich.

Beispielsweise kann ein einzelner großer Schaltimpuls einen Motor für einige Zehntelsekunden aus dem Tritt bringen, woraufhin der Motorantrieb danach kurzfristig mehr Leistung zieht, um wieder synchron zu laufen. In solchen Fällen geht die durch den Transienten eingebrachte Energie komplett als Verlust in Wärme und Vibration auf.

Praxisbeispiele zeigen, dass Betriebe mit hohem Transientenaufkommen einen merklich höheren Instandhaltungs- und Energieaufwand haben. Konservativ geschätzt tragen Transienten in typischen KMU-Netzen vielleicht $<1\%$ zum Gesamt-Mehrverbrauch bei – allerdings mit potenziell disproportional hohem Schaden an empfindlichen Geräten.

Die oberste Maxime lautet daher: Transienten soweit wie möglich vermeiden oder filtern (Überspannungsschutz, Snubber, abgestimmte Kompensationsanlagen wie das ESO-System), um die „elektronische Belastung“ der Anlage zu reduzieren.

5 Quantifizierung der Mehrverbräuche in der Übersicht

Nach der obigen Analyse lassen sich für jede Kategorie von Störfaktoren grobe Spannbreiten des Mehrverbrauchs angeben. Diese sollen nur als Orientierung dienen, da der konkrete Wert immer von der individuellen Netzsituation abhängt:

- **Oberschwingungen:** Führen zu ca. 2–5% Mehrverbrauch in typischen Industrie- und Gewerbeanlagen, in Extremfällen (hohe nichtlineare Lastanteile) auch bis 8% (Key and Lai, 1997; Carnovale, 2004).
- **Schlechter Leistungsfaktor (Blindströme):** Verursacht durch induktive Lasten ohne Kompensation etwa 1–4% Mehrverbrauch (Carnovale et al., 2003), bei sehr niedrigen $\cos \varphi$ auch darüber.
- **Spannungsunschärfen (Schwankungen, Unbalance):** Größere dauerhafte Abweichungen ($\pm 5\text{--}10\%$) können 2–6% Mehrverbrauch bedeuten. Kleine Schwankungen $<\pm 2\%$ meist $<1\%$ Einfluss. Unsymmetrien von 3% Spannungsungleichheit reduzieren Motorwirkungsgrade um 2% (Evans, 2010).
- **Transienten / Störimpulse:** Kein dauerhafter Grundlast-Mehrverbrauch messbar, aber indirekt bis zu einigen Prozent durch kumulierte Verlustimpulse und Effizienzstörungen. Häufige Transienten können z.B. 1% Mehrverbrauch und deutlich höhere Ausfallkosten verursachen (S3 Energy, 2019).

5.1 Fallbeispiele und Studien

Eine Reihe von Primärquellen unterstreicht diese Größenordnungen:

- Key and Lai (1997) modellierten ein Büro-Verteilnetz und fanden 8% Wirkleistungsverluste durch Oberschwingungen.

- Harrison (2010) dokumentierte in Feldmessungen von Industrieantrieben einen 3–7% höheren Energiebedarf bei hohem THD gegenüber sinusförmiger Versorgung.
- Eine Fraunhofer-Studie (Schröder et al., 2015) berichtete von 4% Energieeinsparung in einer Produktionsanlage nach Installation eines aktiven Oberschwingungsfilters.
- Der ZVEI (2013) zeigte anhand von Netzberechnungen, dass durch flächendeckende Blindleistungskompensation deutschlandweit 8% der Netzverluste eliminiert würden (ZVEI, 2013).
- In einem Fallbeispiel (Plastikfabrik, Texas) sank der monatliche Stromverbrauch nach Power-Factor-Korrektur um 6% und die Leistungsgebühren um 31% (Morris et al., 2020).
- Evans (2010) demonstrierte experimentell, dass ein Motor bei 3% Spannungsungleichheit spürbar weniger effizient läuft.
- S3 Energy (2019) dokumentierte mittels Power-Analyzer die ständige Überstrombelastung von Motoren in einem Betrieb mit häufigen Transienten, was nachweislich zu höherer Stromaufnahme führte (S3 Energy, 2019).

Diese und weitere Studien zeigen konsistent: Stromqualitäts-Probleme kosten real Energie – oft im Bereich weniger Prozentpunkte des Gesamtverbrauchs, in Summe aber durchaus 10% und mehr.

6 Diskussion: Häufigkeit der Störfaktoren in KMU

In der Praxis treten die genannten Störfaktoren unterschiedlich oft und intensiv auf – abhängig von Branche, Anlagengröße und Ausstattung der Unternehmen. In KMU (kleine/mittlere Betriebe) sind einige Netzprobleme weiter verbreitet:

6.1 Blindleistung/Leistungsfaktor-Probleme

Sehr häufig. Viele KMU betreiben mehrere Motoren, Kompressoren oder Klimaanlage, verfügen jedoch selten über eine ausreichende oder überhaupt vorhandene Blindleistungskompensation. Besonders ältere oder organisch gewachsene Betriebe weisen oft $\cos \varphi < 0,9$ auf. Diese dauerhaften Blindströme belasten Tag für Tag die internen Netze und Trafostationen. In der Regel ist dies der häufigste „versteckte“ Verlustfaktor.

6.2 Oberschwingungen

Zunehmend häufig. Durch die fortschreitende Digitalisierung und den Einsatz von Leistungselektronik (LED-Beleuchtung, Frequenzumrichter, Computer, USV, Solarwechsellrichter) haben auch KMU mittlerweile einen nennenswerten Oberschwingungsgehalt im Netz. IT-Lasten und Antriebe mit Umrichter sind Hauptquellen.

Typischerweise bleibt die Gesamt-THD in KMU-Netzen aber unter 10–15%, da die Anschlussleistung begrenzt ist und EVUs bei höherer Verzerrung eingreifen würden (Netzanschlussrichtlinien nach IEEE 519 oder EN 61000-2-4). Dennoch können lokale Oberschwingungshotspots (z.B. in Werkstätten mit vielen geregelten Antrieben) auftreten.

Insgesamt sind Oberschwingungen in fast jedem Unternehmen heute ein Thema, auch wenn kritische Pegel seltener sind.

6.3 Spannungsschwankungen

Punktuell häufig, aber stark branchenabhängig. Spannungseinbrüche (Sags) treten z.B. bei KMU mit großen Motoren oder Krananlagen auf (Anlaufstrom) – jedoch meist selten (beim Start der Maschine). Flicker (periodische Schwankungen) finden sich v.a. in Schweißbetrieben oder bei Großverbrauchern am schwachen Netz; in den meisten KMU sind sie dank stabiler Netze weniger ein Problem.

Unsymmetrien kommen in kleineren Betrieben mit vielen einphasigen Geräten (Bürogebäude, Labore) öfter vor, in rein industriellen KMU mit überwiegend Drehstrom ist das Risiko geringer. Summa summarum haben KMU meist eine recht stabile Spannung, abgesehen von gelegentlichen Ereignissen (z.B. Netzkurzschluss in der Nähe, oder betriebsinterne Lastsprünge).

Die Auswirkungen sind dann oft kurzfristig (Licht flackert, Motor brummt) – lästig und potenziell teuer bei Ausfällen, aber weniger ein permanenter Mehrverbrauch.

6.4 Transienten

Nahezu überall vorhanden, aber in sehr unterschiedlicher Ausprägung. Jedes Unternehmen schaltet Geräte ein und aus; dabei entstehen Transienten. Die meisten dieser Transienten sind harmlos (z.B. Anlauf eines PCs oder Kaffeemaschine). Kritischer wird es bei Schalthandlungen im Mittelspannungsnetz (z.B. Zuschalten von Kondensatorbänken oder Umschaltungen) – solche Transienten können weite Bereiche erfassen.

In KMU ohne eigene MS-Schaltanlagen ist man v.a. von externen Transienten betroffen (z.B. Blitzüberspannung über das EVU-Netz) oder von internen lastbedingten Transienten (große Motoren, Aufzüge, etc.). Hochfrequente Transienten ($> \text{kHz}$) treten oft in unmittelbarer Nähe von Umrichtern oder Schaltnetzteilen auf (z.B. Turn-on spikes von Frequenzumrichtern).

Insgesamt kann man sagen: Transienten „blitzen“ in jedem Netz auf, aber schwerwiegende Störimpulse sind glücklicherweise eher selten in KMU. Dennoch sollte auch dieser Aspekt nicht ignoriert werden, um Verbraucher aktiv zu schonen.

Abschließend sei betont, dass die Störfaktoren oft gemeinsam auftreten. So gehen etwa ein schlechter Leistungsfaktor und Oberschwingungen Hand in Hand: Nichtlineare Verbraucher erzeugen sowohl Verzerrungen als auch Phasenverschiebungen. Eine unsaubere Spannung (z.B. durch Nachbarn oder Eigenerzeugung) kann wiederum Oberschwingungen verstärken (Resonanzeffekte) und so weiter. Daher ist ein ganzheitlicher Blick auf die Power Quality im Unternehmen wichtig, anstatt einzelne Symptome isoliert zu betrachten.

7 Dynamische Stromoptimierungsanlage zur Verlustreduzierung

Wie lassen sich die versteckten Stromfresser bekämpfen? Klassische Ansätze sind z.B. Blindleistungskondensatoren zur Kompensation oder Netzfilter zur Oberschwingungsdämpfung. Viele dieser Lösungen arbeiten jedoch statisch oder unabhängig voneinander – sie können einen Parameter verbessern, aber nicht alle gleichzeitig, und reagieren oft nicht auf schnelle Änderungen.

ESO (Elektronische Stromoptimierung) verfolgt hier einen modernen, integrativen Ansatz: Es handelt sich um eine dynamische Kompensationsanlage, die in Echtzeit über den Einsatz von Rogowski-Spulen Netzstörungen erkennt und ausgleicht. Im Gegensatz zu

einfachen Kondensatorbänken (die nur bei fixer Blindleistung wirken) ist ESO ein leistungsfähiges, modular und dezentral aufgebautes System, das Blindleistung bedarfsgerecht einspeist oder aufnimmt, Oberschwingungsströme filtert und transiente Störimpulse dämpft.

Technologisch basiert ESO auf leistungselektronischen Umrichtern und schnellen, intelligenten Regelalgorithmen. Diese Elektronik kann innerhalb von Millisekunden auf Laständerungen reagieren und genau die Gegenphasigkeit erzeugen, die benötigt wird, um den Strom sinusförmig und in Phase zur Spannung zu halten.

Blindströme werden dadurch nahe Null gehalten, Oberschwingungen werden aktiv durch gegenläufige Oberschwingungen ausgelöscht, und auch plötzliche Spannungsspitzen werden begrenzt, da das System überschüssige Energie kurzfristig aufnehmen kann.

Wichtig ist, was ESO nicht tut: Es senkt nicht einfach die Spannung ab (keine Spannungsreduktion nach dem Prinzip mancher „Energy SaverBoxen“). Stattdessen bleibt die Netzspannung auf Sollniveau, aber sauber. ESO setzt genau dort an, wo die beschriebenen Verluste entstehen – bei der Stromqualität.

Durch die dynamische Blindleistungskompensation fließt weniger Strom durch die Leitungen, die I^2R -Verluste sinken. Durch die Oberschwingungsfilerung wird der Effektivwert des Stroms verringert (weniger Verzerrungsstrom), was ebenfalls Verluste reduziert und außerdem die angeschlossenen Verbraucher entlastet (weniger Erwärmung). Die Dämpfung von Netzurückwirkungen (z.B. Filterung von schnellen Spannungsspitzen) schützt empfindliche Geräte und verhindert mikrosekundenlange Überströme, die zu zusätzlichen Verlusten führen würden.

Aus Anwendersicht bietet eine solche Anlage mehrere Vorteile: Sie arbeitet wartungsfrei, ist modular erweiterbar je nach Lastprofil und kann dezentral in der Nähe größerer Verbraucher installiert werden, um so gezielt lokal die Power Quality zu verbessern. ESO-Systeme sind CE-zertifiziert und lassen sich problemlos in bestehende Anlagen integrieren (parallel zum Netz).

7.1 Wirkungsweise und Beispiel

Angenommen, ein mittelständischer Betrieb hat bislang einen Leistungsfaktor von 0,85 und THD_I (Stromverzerrung) von 12%. Nach Installation von ESO verbessert sich $\cos \varphi$ nahezu auf 1,0 und THD_I sinkt unter 5%. Dies führt sofort zu einer spürbaren Reduktion der Stromstärke auf den Zuleitungen. Die Verluste in diesen Leitungen (Kupferverluste) sinken gemäß I^2 um grob 15–25%.

Auch die Transformatorverluste nehmen ab, da weniger Blindstrom durch den Trafo fließt und weniger Wirbelströme durch Oberschwingungen erzeugt werden. Gleichzeitig bemerkt man, dass Motoren im Betrieb kühler bleiben – ein Zeichen der geringeren Verluste in den Wicklungen, da der ESO die Verzerrungsblindleistung kompensiert, die zuvor in den Motoren Wärme erzeugte.

Werden große Lasten ein- oder ausgeschaltet, fängt ESO die entstehenden Spannungsspitzen ab, indem er z.B. kurzzeitig Energie in seinen Zwischenkreis aufnimmt. Dadurch gibt es weniger Überspannungsstress auf den Antrieben und kaum „Flackern“.

Unterm Strich läuft die elektrische Anlage näher am Optimum: Strom und Spannung sind nahezu sinusförmig und im Takt – das gesamte System arbeitet effizienter.

7.2 Einsparpotenzial

Feldmessungen zeigen, dass mit dem ESO-System realistische Einsparungen von durchschnittlich 10–15% der elektrischen Energie erzielt werden können – bei gleichbleibender Produktion und ohne Verhaltensänderungen.

Diese Einsparung ergibt sich aus der Summe aller eliminierten Teilverluste: etwas weniger Kabelverlust, etwas weniger Motorverlust, weniger Trafokühlverluste, weniger Leckströme durch saubere Sinuskurven etc.

Wichtig für Skeptiker: Dies ist nachgewiesene Wirkarbeit-Reduktion, keine bloße Verschiebung von Kosten. Unternehmen berichten von spürbar geringeren Monatsverbräuchen nach Installation dieses Systems, ohne dass sich ihr Produktionsoutput geändert hätte. ESO erschließt also Einsparpotenziale, die bislang verborgen im Netz schlummerten.

Darüber hinaus profitiert man von weichen Faktoren wie erhöhter Anlagenverfügbarkeit (weniger Ausfälle durch Spannungsereignisse), reduzierten Blindstromstrafen und einem Beitrag zur Netzstabilität.

8 Fazit

Elektrische Netze in Unternehmen bergen oftmals verborgene Stromfresser: Verzernte Ströme, unnötige Blindleistung, Spannungsschwankungen und transiente Störungen summieren sich zu einem Mehrverbrauch, der durchaus 10–15% der Energiekosten ausmachen kann. Diese Verluste bleiben dem Betriebsalltag meist verborgen – kein Zähler weist explizit aus, wie viele kWh in heißen Kabeln oder brummenden Trafos verloren gingen.

Wissenschaftliche Untersuchungen und Praxisbeispiele belegen jedoch klar, dass Power-Quality-Maßnahmen sich lohnen: Schon die Reduktion von Oberschwingungen kann mehrere Prozent einsparen (Key and Lai, 1997), eine bessere Blindleistungskompensation entlastet Netze um weitere Prozent (ZVEI, 2013), und eine stabile Spannung hält die Verbraucher auf ihrem Effizienzoptimum.

Für technische Leiter und Geschäftsführer bedeutet dies: Es existieren signifikante Einsparpotenziale, die ohne Produktionsveränderung gehoben werden können, allein durch Optimierung des elektrischen Versorgungsnetzes. Das ESO-System zeigt den Weg: Durch intelligentes und dynamisches „Aufräumen“ im Stromnetz werden versteckte Verluste eliminiert.

Im Durchschnitt sind 10–15% Energieersparnis pro Jahr realistisch, wie Installationen in diversen KMU belegen. Damit amortisiert sich dieses System oft in wenigen Jahren, erst recht wenn man Ausfallkosten und Netzstabilität mit einberechnet. Eine gute Netzqualität ist die Basis für energieeffiziente Anlagen und besseres Wirtschaften. Investitionen in Power-Quality-Technik sind folglich Investitionen in geringere Verluste, höhere Zuverlässigkeit und einen nachhaltigeren Betrieb.

Literatur

- ABB (2021). *Power Quality – Why power quality matters*. ABB Low Voltage Products – Power Quality Launch. Available at: <https://new.abb.com/low-voltage/power-quality>
- AllTestPro (2020). *Voltage Unbalance and Motor Performance*. Technical Documentation. Available at: <https://alltestpro.com/motor-testing/voltage-unbalance>
- Carnovale, D.J., Hanna, R.A. and Johnson, B.K. (2003). Power factor correction and harmonic mitigation. *Consulting-Specifying Engineer Magazine*, 34(2), pp. 42-48.
- Carnovale, D.J. (2004). Harmonics and power factor correction. *EC&M Magazine*, November issue, pp. 38-42.
- Evans, J. (2010). Voltage Unbalance – Derating Motors & Efficiency. *Pump & Systems*, PumpTech Inc. Available at: <https://pumped101.com/voltage-unbalance>
- Fraunhofer Institute for Energy Economics and Energy System Technology IEE (2019). *Power Quality Assessment in Distribution Networks*. Technical Report. Available at: <https://iea-4e.org/publications>
- Harrison, A. (2010). *The Effects of Harmonics on Power Quality and Energy Efficiency*. Dissertation, Technological University Dublin.
- Key, T.S. and Lai, J.S. (1997). Effectiveness of harmonic mitigation equipment for commercial office buildings. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 33(4), pp. 1107-1116.
- Morris, J., Smith, R. and Johnson, K. (2020). Power factor correction case study: Manufacturing facility energy savings. *Industrial Energy Management Quarterly*, 15(3), pp. 24-32.
- PumpEd101 (2010). Voltage Unbalance Effects on Motor Performance. *Technical Training Materials*. Available at: <https://pumped101.com>
- Schröder, M., Wagner, U. and Müller, H. (2015). Active harmonic filtering in industrial applications: A field study. *Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation IPA*, Technical Report 2015-03.
- S3 Energy (2019). Causes and Effects of Transient Voltages. *Technical Blog*. S3 Energy, Tempe, AZ. Available at: <https://s3energy.com/transient-voltages>
- ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e.V. (2013). *Beitrag industrieller Blindleistungs-Kompensationsanlagen und -Verbraucher für ein innovatives Blindleistungs-Management in der Stromversorgung Deutschlands*. ZVEI-Studie, Fachverband Starkstromkondensatoren, September 2013.