

---

WHITE PAPER

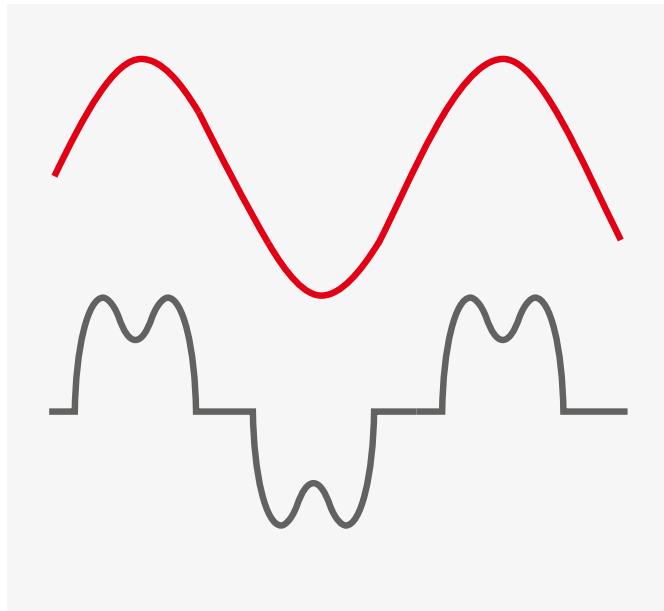
# **Ultra-Low Harmonic Drives und rückspeisefähige Frequenzumrichter**

zur Verbesserung der Effizienz und  
Zuverlässigkeit von Prozessen und Systemen



# Was sind elektrische Oberschwingungen und weshalb sollte man sie berücksichtigen?

Elektrische Anlagen laufen am effizientesten und zuverlässigsten, wenn sie mit sauberem, störungsfreiem Strom versorgt werden. Stromnetze sind aus verschiedenen Gründen jedoch oft vorübergehenden oder dauerhaften elektromagnetischen Störungen ausgesetzt. Eine der Hauptursachen für Dauerstörungen sind Oberschwingungen, die nicht nur die Effizienz des Stromnetzes sondern auch seine Zuverlässigkeit erheblich beeinträchtigen können.



In einer idealen Welt würde in der Stromversorgung überall eine reine sinusförmige Spannung vorliegen (oben). In der Realität werden Netzspannung und -strom jedoch oft durch unerwünschte Oberschwingungen verzerrt (unten).

Oberschwingungen sind eine elektromagnetische Verschmutzung des Stromnetzes und führen zu einer Verzerrung des Sinusverlaufs von Strom und Spannung. Ursache ist die hohe Schaltfrequenz von leistungselektronischen Komponenten. Diese nicht linearen Verbrauchern sind beispielsweise LED-Beleuchtungen, unterbrechungsfreie Stromversorgungen, Computer oder Frequenzumrichter.

Der Oberschwingungsanteil wird als ein Prozentwert angegeben. Dieser Prozentwert nennt sich „gesamte harmonische Verzerrung“ (THD) oder „Oberschwingungsgehalt“ und ist das Verhältnis aller Strom- oder Spannungsoberschwingungen zur Grundschwingung (50Hz Grundfrequenz) des Stroms oder der Spannung. Liegen keine Strom- oder Spannungsoberschwingungen vor, hat der THD einen Wert von Null Prozent.<sup>1</sup> Oberschwingungen wirken sich negativ auf Stromnetze und sich darin befindliche Geräte aus. Je

höher der Oberschwingungsgehalt, desto höher die Stromfluss- und desto höher die Verluste im Netz und seinen Komponenten (z. B. Transformatoren, Schalter, Leistungsschalter und Kabel). Ein erhöhter Netzstrom kann auch dazu führen, dass elektrische Betriebsmittel aufgrund von Überhitzung vorzeitig ausfallen. Empfindliche elektrische Komponenten wie beispielsweise Messeinrichtungen können durch Oberschwingungen gestört oder sogar beschädigt werden.

Oberschwingungen verursachen nicht immer sofort Probleme. Es kann auch erst nach einer gewissen Zeit oder bei Zuschaltung bestimmter Gerätekombinationen zu Funktionsstörungen kommen. Auftretende Probleme werden von den Nutzern oft gar nicht auf Oberschwingungen zurückgeführt. In ausfallkritischen Anlagen wie Datenzentren können sie jedoch schwerwiegende Folgen haben und Vermögens- und Reputationsschäden nach sich ziehen oder, in Krankenhäusern, das Leben der Patienten gefährden. Deshalb ist es wichtig, bei der Auswahl der Geräte darauf zu achten, dass sie keine unerwünschten Auswirkungen auf das Stromversorgungssystem oder die angeschlossenen Geräte haben, was zugleich auch die Zuverlässigkeit und Effizienz der Prozesse verbessert.

Die Berücksichtigung der Oberschwingungen bei der Planung neuer Vorhaben kann auch erhebliche Auswirkungen auf die Bemessung der elektrischen Anlagen und die Nachhaltigkeit des Projekts haben.

# Frequenzumrichter und ihr Einfluss auf die Oberwellenbelastung

Mit Hilfe von Frequenzumrichtern lässt sich bei Prozessen mit wechselnden Lasten eine Menge an Energie einsparen, weil sie die Motordrehzahl genau an die Prozesserfordernisse anpassen. Dabei sollte ihr Einfluss auf das Stromnetz und die daran angeschlossenen Geräte jedoch nicht vergessen werden.

## Die Rolle von Frequenzumrichtern in der Industrie

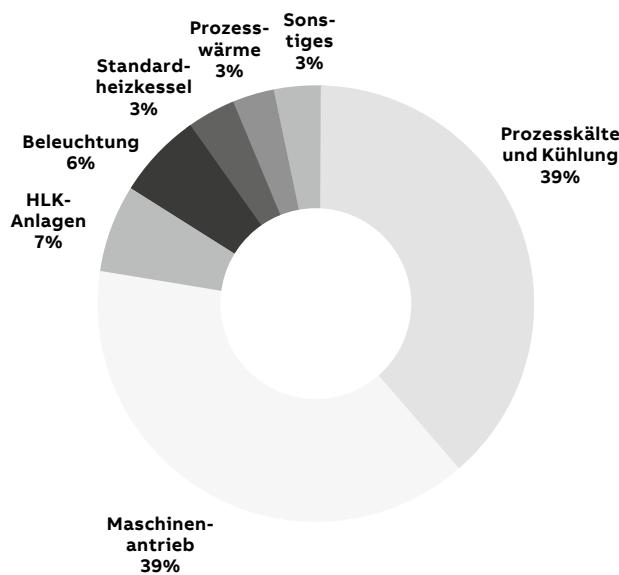
Berichten zufolge entfallen rund 50 Prozent des Energieverbrauchs in einem durchschnittlichen Zweckgebäude auf Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlagen (HLK).<sup>2</sup> So wie die Anzahl der Personen, die sich im Verlauf eines Tages in einem Zweckgebäude aufhalten verändert, variiert auch der HLK-Bedarf. Die umfassende Erfahrung von ABB zeigt, dass Frequenzumrichter den Energieverbrauch in HLK-Prozessen um 20 bis 60 Prozent senken können. Damit verkleinern sie den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und verhelfen den Anlageneigentümern zu erheblichen Einsparungen bei den Betriebskosten.

Ein weiteres gutes Beispiel sind Molkereien. Hier werden rund 40 Prozent der Energie für die Prozesskühlung und die

Kälteerzeugung verbraucht, weitere 40 Prozent verschluckt die automatische Produktion und 10 Prozent entfallen auf HLK-Anwendungen.<sup>3</sup> Bei all diesen Prozessen gibt es Lastschwankungen, weshalb der Einsatz von Frequenzumrichtern hier ganz erhebliche Energieeinsparungen ermöglicht.

Dabei ist jedoch zu bedenken, dass Frequenzumrichter, wie andere nicht lineare Verbraucher auch, Netzoberschwingungen verursachen, die sich, wie bereits erwähnt, nachteilig auf das Stromnetz und die angeschlossenen Geräte auswirken können, wenn sie bestimmte Grenzwerte überschreiten. Die durch Frequenzumrichter erzeugten Oberschwingungen müssen daher bei der Planung bedacht und die Auswirkungen und Folgen für die Einrichtung abgeschätzt werden.

## Stromnutzung in der Molkereibranche, nach Tätigkeiten



## Der Einfluss von Frequenzumrichtern (FU) auf die Effizienz von Stromnetzen

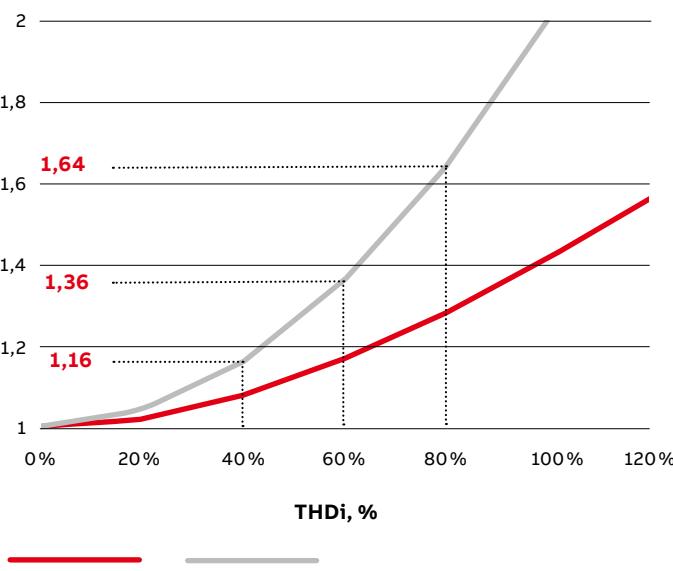
Auch wenn sich mit FU-gesteuerten Prozessen Energie einsparen lässt, muss bedacht werden, wie Frequenzumrichter die Effizienz des Stromnetzes beeinflussen, an das sie angeschlossen sind. Fließt ein elektrischer Strom durch einen Leiter, entstehen durch den Leiterwiderstand Verluste, die in Wärme umgewandelt werden (sogenannte Ohmsche Verluste):

$$P = I^2 \cdot R$$

Dabei steht  $P$  für die Wärmeverluste,  $R$  ist der Leiterwiderstand und  $I$  der Netzstrom. Der Effektivwert des Stroms  $I_{rms}$  ist höher als der Grundstrom  $I_1$  und kann mit der folgenden Gleichung beschrieben werden:

$$I_{rms} = I_1 \cdot \sqrt{1 + THD_i^2}$$

Anhand der vorstehenden Gleichungen lässt sich berechnen, um wieviel der Oberschwingungsgehalt die Stromverluste erhöht. Beispiel:  $I_{rms}$  Stromverluste erhöhen sich bei 40 % THDi um das 1,16-Fache im Vergleich zu einem System ohne Oberschwingungen. Das bedeutet eine geringere Netzeffizienz und einen erhöhten Energieverbrauch zur Deckung des Prozessbedarfs.



Effektivstrom  $I_{rms}$  und relative ohmsche Verluste als eine Funktion des THDi.

## Der Einfluss von Frequenzumrichtern auf die Projektkosten

Zu der vorstehend geschilderten Problematik kommt hinzu, dass bei einem erhöhten Netzstrom das Stromversorgungssystem überdimensioniert werden muss, um die Belastung durch den zusätzlichen Strom tragen zu können. Die größer ausgelegten Komponenten bedeuten einen höheren Materialeinsatz und damit eine geringere Nachhaltigkeit der Einrichtung.

Ein geringer Oberschwingungsgehalt bedeutet, dass keine überdimensionierten Kabel notwendig sind. Bei einem hohen THDi dagegen müssen die Kabel wegen des erhöhten

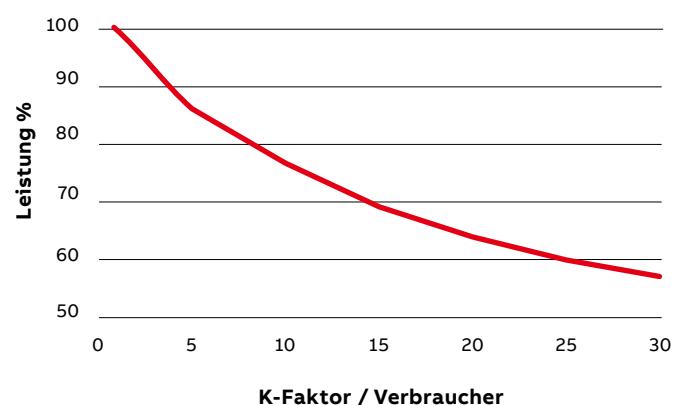
Netzstroms überdimensioniert sein, um die Überhitzung der Kabel, die Beschädigung der Isolierung und damit eine mögliche Brandgefahr zu vermeiden. Es gibt bestimmte Empfehlungen für die Auslegung von Kabeln, die den THDi des Netzes berücksichtigen. Danach ist bei einem THDi unter 10 Prozent keine zusätzliche Überdimensionierung erforderlich. Der für Standard-6-Puls-Frequenzumrichter mit Drossel typische THDi von 40 Prozent erfordert dagegen eine 10-prozentige Überdimensionierung. Bei einem THDi von 70 Prozent wird sogar eine 20-prozentige Überdimensionierung verlangt.

Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Überdimensionierung ist der Transfator. Er ist oft eine der teuersten Komponenten eines Stromnetzes. Wird ein nicht linearer Verbraucher (beispielsweise ein Frequenzumrichter) von einem Transfator gespeist, muss einer Leistungspuffer bei der Auslegung eingerechnet werden, um eine Überhitzung und einen Ausfall zu vermeiden. Bei einem THDi von 40 Prozent sollte die Transfatorausrüstung um etwa 40 Prozent überdimensioniert werden, bei einem THDi unter 10 Prozent wird eine 10-prozentige Überdimensionierung empfohlen.

Die unabhängige Kontrollorganisation Underwriter Laboratories hat den sogenannten K-Faktor festgelegt. Er beschreibt die Fähigkeit eines Transfators, nichtlineare Lasten zu versorgen, ohne den Nenntemperaturanstieg zu überschreiten.<sup>4</sup> Der K-Faktor liegt in einem Bereich zwischen 1 und 50.

Ein K-Faktor von 50 kommt zum Einsatz, wenn sehr hohe harmonische Verzerrungen zu erwarten sind. Standardtransfatoren haben einen K-Faktor von 1,0 und werden nur linearen Lasten zugewiesen, die keine Oberschwingungen erzeugen. Dem nachfolgenden Diagramm kann die Auswirkung von unterschiedlichen Verbrauchertypen auf die Transfatorleistung sowie die erforderliche Leistungsreduzierung bei unterschiedlichen THDi Werten entnommen werden.

## Typische Leistungsreduzierung bei einem Transfator



## Der Einfluss von Frequenzumrichtern auf die Prozesszuverlässigkeit

Oberschwingungen erhöhen nicht nur den Energieverbrauch, treiben durch überdimensionierte Komponenten die Projekt-kosten in die Höhe und mindern die Nachhaltigkeit eines Systems. Sie können auch die Zuverlässigkeit beeinträchtigen,

## K-Faktoren für verschiedene Verbraucher

Verbraucher	K-Faktor
Motoren, Glühlampen, Widerstandsheizung, Umformer (ohne integrierte Frequenzumrichter)	K-1
HID-Beleuchtung, Induktionsheizgeräte, Schweißgeräte, USV mit optionaler Eingangsfilterung, SPS Steuerungs-Systeme	K-4
USV ohne optionale Eingangsfilterung, Produktions- oder Montagelinienausstattung, Schul- und Klassenraumeinrichtungen	K-13
Thyristor-Frequenzumrichter, Stromkreise ausschließlich mit Datenverarbeitungsgerät, intensivmedizinische Einrichtungen	K-20
Stromverteilungen in Gewerbe-, Industrie-, Medizin- und Lehrlaboren	K-30
Sonstige als Erzeuger erheblicher Oberschwingungen erkannte Verbraucher	K-40

insbesondere die Zuverlässigkeit der für die Anlagen und Prozesse lebenswichtigen Stromversorgung. Stromausfälle können schwerwiegende Folgen haben, beispielsweise in ausfallkritischen Anlagen wie Krankenhäusern, wo sie das Leben der Patienten gefährden, oder in Produktionsanlagen, wo sie massive finanzielle Verluste nach sich ziehen können. In einem Datenzentrum kostet jede Minute Stillstand durchschnittlich 5.600 US-Dollar – von dem Schaden für die Reputation ganz zu schweigen.<sup>5</sup>

Generatoren, die Reservestrom für derartige Einrichtungen liefern, müssen deshalb so ausgelegt sein, dass bei der Speisung nichtlinearer Lasten, die starke Oberschwingungen erzeugen, keine Überlastungen auftreten. Eine Faustregel besagt, dass ein Generator, der einen 6-Puls-Frequenzumrichter versorgt, um das 2- bis 2,5-Fache überdimensioniert sein muss. Andernfalls funktioniert sein automatischer Spannungsregler aufgrund eines zu hohen Oberschwingungsanteils möglicherweise nicht ordnungsgemäß. Unter diesen Umständen kann sich der Generator abschalten.

Ein weiterer Aspekt der Prozesszuverlässigkeit ist die Versorgung der FU-geregelten Anwendung im Nennpunkt. Das kann beispielsweise in langen Tunneln eine echte Heraus-

forderung sein. Hier müssen Ventilatorkabel über mehrere hundert Meter verlegt werden, was mit einem erheblichen Spannungsabfall verbunden ist, so dass beim Ventilatormotor weniger Spannung ankommt. Bei regulärem Betrieb kann dies zu einer erhöhten Abgaskonzentration und zu einer Beeinträchtigung der Sicht im Tunnel während der Stoßzeiten führen. Im Notfall können die Abluftventilatoren die Abgase möglicherweise nicht mehr mit der vorgegebenen Durchsatzrate absaugen, was zu einer Gefährdung der sich im Tunnel befindlichen Personen führt.

Eine mögliche Lösung für das Problem des Spannungsabfalls ist der Einsatz von zwischengeschalteten Aufwärttransformatoren. Dadurch steigen jedoch die Projektkosten, und die notwendigen zusätzlichen Komponenten beeinträchtigen die Projektnachhaltigkeit. Eine andere Option ist die Verwendung von Active Front-End-Frequenzumrichtern (AFE) mit DC-Zwischenkreiskondensatoren zur Prozesssteuerung. Mit Hilfe dieser Technologie kann die Spannung am Motor wieder auf die Nennspannung erhöht und der Motor somit am Nennpunkt betrieben werden. Diese Technologie wird im nächsten Kapitel näher beschrieben.

# Active Front-End-Frequenzumrichter

## und ihre Vorteile gegenüber anderen Lösungen

Heute sind viele Frequenzumrichter-Technologien auf dem Markt, die jedoch in Bezug auf die Stromqualität sehr unterschiedliche Leistungen bieten. Überall dort, wo ein geringer Oberschwingungsgehalt für eine Anwendung von entscheidender Bedeutung ist, sollten die Frequenzumrichter deshalb sorgfältig ausgewählt werden, um teure zusätzliche Komponenten wie Oberwellenfilter und negative Auswirkungen auf die Prozesszuverlässigkeit zu vermeiden.

### Was ist die Technologie der AFE-Frequenzumrichter mit DC-Zwischenkreiskondensatoren?

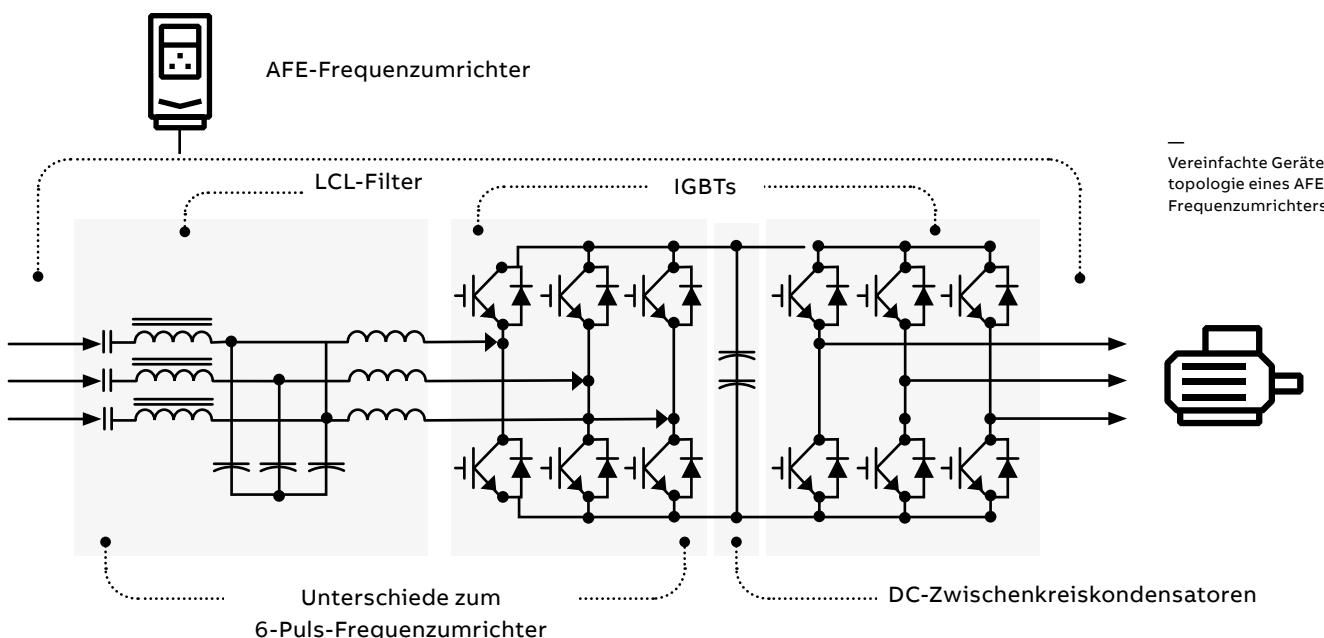
Active Front-End-Frequenzumrichter (AFE) mit DC-Zwischenkreiskondensatoren und ihre Vorteile stehen im Mittelpunkt dieses Dokuments, und die Technologie wird im Folgenden näher beschrieben.

Frequenzumrichter passen die Drehzahl und das Drehmoment von Wechselstrommotoren an die Anforderungen der Anwendung an, indem sie die Motoreingangsfrequenz und -spannung entsprechend ändern. Sie werden dem Motor vorgeschaltet und regeln die dem Motor zugeführte Leistung. Im Innern des Frequenzumrichters wird der eingehende Wechselstrom zunächst über einen Gleichrichter in Gleichstrom umgewandelt, der dann mit Kondensatoren geglättet wird. Im nächsten Schritt wandelt ein Wechselrichter den eingehenden Gleichstrom dann wieder in Wechselstrom um, der dem Motor zugeführt wird. Der Wechselrichter passt die Frequenz und Spannung des dem Motor zugeführten Stroms so an, dass der Motor, statt mit Nenndrehzahl und Nenn-

drehmoment, mit einer Drehzahl und einem Drehmoment läuft, die optimal auf die Prozesserfordernisse abgestimmt sind. Auf diese Weise wird viel Energie eingespart, die Prozesszuverlässigkeit wird erhöht und die Qualität des Endprodukts wird verbessert.

Wie ein konventioneller 6-Puls-Frequenzumrichter wandelt auch ein AFE-Frequenzumrichter Wechselstrom (AC) in Gleichstrom (DC) um, um diesen dann wieder in Wechselstrom umzuwandeln. Der Unterschied zwischen diesen beiden Frequenzumrichtertypen liegt in der Art, wie sie den Strom gleichrichten.<sup>6</sup>

Konventionelle 6-Puls-Frequenzumrichter besitzen eine 6-Puls-Diodengleichrichterbrücke. Bei AFE-Frequenzumrichtern kommen demgegenüber Bipolartransistoren mit isolierter Gate-Elektrode (Insulated Gate Bipolar Transistors – IGBT) zum Einsatz. Die präzise Steuerung der Eingangs-IGBTs sorgt dafür, dass der aus dem Netz entnommene Strom sinusförmig bleibt.





Die Ultra-Low Harmonic Drives von ABB – Frequenzumrichter für Industrie- (ACS880), HLK- (ACH580) und Wasseranwendungen (ACQ580) – basieren auf einer Active Front-End-Technologie mit DC-Zwischenkreiskondensatoren.

Ein weiterer Unterschied zum 6-Puls-Frequenzumrichter ist der bei AFE-Umrichtern integrierte LCL-Filter (Spule-Kondensator-Spule) vor den Front-End-IGBTs. Der LCL-Filter entfernt auch Oberschwingungen, die oberhalb der Schaltfrequenz des IGBT liegen. Dies alles führt zu einem Oberschwingungsgehalt im Netz von typischerweise 3 Prozent. Eine konventionelle 6-Puls-Lösung weist im Vergleich einen THDi von rund 40 Prozent auf. Im Gegensatz zu anderen Frequenzumrichter-Technologien, die teure Zusatzlösungen erfordern, um Oberschwingungen auf ein Minimum zu reduzieren, lassen ActiveFront-End-Frequenzumrichter mit DC-Zwischenkreiskondensatoren Oberschwingungen gar nicht erst entstehen.

#### Die Vorteile von Ultra-Low Harmonic Drives

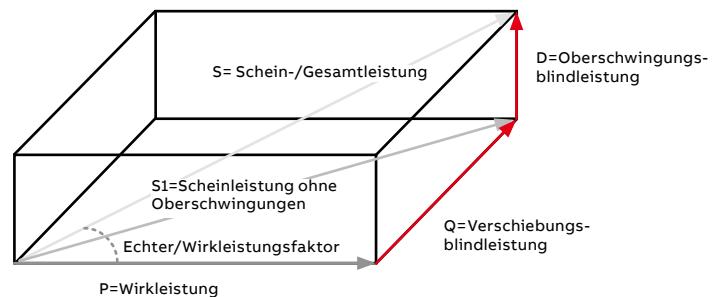
ABB bietet ein breites Spektrum an industriellen und branchenspezifischen ULH-Frequenzumrichtern für HLK, Wasser- und Abwasseranwendungen, die auf der Active Front-End-Technologie basieren und der Industrie vielfältige Vorteile bieten.

Bei einem THDi von typischerweise 3 Prozent müssen Stromnetzkomponenten wie Generatoren, Transformatoren, Schaltanlagen und Kabel bei neuen Projekten nicht mehr massiv überdimensioniert werden, und der geringere Material-einsatz macht diese Projekte zudem nachhaltiger.

Bei Modernisierungsprojekten mit einer bereits bestehenden Stromnetzinfrastruktur kann durch Verwendung von AFE-Frequenzumrichtern die Überhitzung und damit der vorzeitige Ausfall der Stromnetzkomponenten vermieden werden – was geschehen kann, wenn die Oberschwingungsbelastbarkeit des Stromnetzes überschritten wird.

ULH-Frequenzumrichter sind in der Lage Oberschwingungen zu reduzieren und Blindleistung zu kompensieren. Blindleistung wird durch induktive und kapazitive Lasten im Netz verursacht. Typische induktive Lasten sind Motoren. Server sind ein gutes Beispiel für kapazitive Lasten. Blindleistung verrichtet keine nutzbare Arbeit, aber induktive oder kapazitive Lasten müssen mit Blindleistung versorgt werden, um die Spannungsstabilität im Netz aufrechtzuerhalten.

Der Blindleistungsgehalt im Stromnetz wird anhand des so genannten Leistungsfaktors beschrieben. Der Leistungsfaktor ist das Verhältnis der Wirkleistung, die die Arbeit verrichtet, zur gesamten dem Stromkreis zugeführten Scheinleistung. Je näher dieser Faktor bei 1 liegt, desto geringer der Blindleistungsgehalt im Netz, desto niedriger der Netzstrom und desto effizienter und zuverlässiger das Stromnetz.



Der Leistungsfaktor (LF) ist das Verhältnis zwischen zwei Komponenten der Blindleistung – des Klirrfaktors und des Verschiebungsfaktors

Der Klirrfaktor ist das Verhältnis des Grundstroms zum Gesamtstrom mit Oberschwingungen:  $1 / \sqrt{1+THD_i^2}$

Der Verschiebungsfaktor ist das Verhältnis der Blindleistung zur Scheinleistung ohne Oberwellen, auch genannt  $\cos\phi: P/S_1$ .

Der LF ergibt sich aus der Multiplikation von Klirrfaktor und Verschiebungsfaktor  $\cos\phi \cdot 1 / \sqrt{1+THD_i^2}$

Werden keine Oberschwingungen ( $THD_i = 0$ ) und keine Blindleistung durch induktive oder kapazitive Lasten verursacht, sind Strom und Spannung in Phase, d. h.  $\phi = 0^\circ$  und  $\cos\phi = 1$ , Gesamt-LF = 1.

Energieversorger erheben für Kunden mit einem hohen Blindleistungsbezug (niedriger Leistungsfaktor) oft Strafgebühren, weil sie mehr Stromerzeugungs- und -verteilungskapazitäten bereitstellen müssen und die Übertragungsverluste höher sind.

Standard-Frequenzumrichter mit DC-Kondensatoren gleichen die Blindleistung der von ihnen gesteuerten induktiven Lasten in der Regel gut aus. Frequenzumrichter nutzen ihre Kondensatoren, um den Motoren Blindleistung zuzuführen.



Modernere Frequenzumrichter mit Active Front-End und DC-Kondensatoren, wie die ULH-Frequenzumrichter von ABB, können jedoch noch mehr. Sie gleichen auch andere Blindlasten im Netz aus, so dass die Endkunden unter Umständen auf die Installation von eigenständigen Blindleistungskompensatoren verzichten können.

ULH-Frequenzumrichter verbessern zudem die Zuverlässigkeit von Einrichtungen und Betrieben. Da sie nur einen äußerst geringen Oberschwingungsgehalt erzeugen, wird das Risiko von Prozessunterbrechungen aufgrund von Netzüberlastungen verringert. Durch Oberwellen hervorgerufene Fehlfunktionen angeschlossener Geräte sind nahezu ausgeschlossen.

Die Voltage Boost-Funktion der ULH-Frequenzumrichter von ABB sorgt für Nennspannung an den Motoranschlüssen selbst bei langen Motorkabeln und schwachen Stromnetzen, wie sie nicht nur in Tunneln, sondern auch in abgelegenen Wasser- und Abwasseranlagen typisch sind. In abgelegenen Wasserkraftwerken kann die Bereitstellung der Nennpumpleistung für die unterbrechungsfreie Trinkwasserversorgung städtischer Gebiete sowie für die Ableitung von Ab- und Oberflächenwasser von entscheidender Bedeutung sein. Die Unterbrechung derartiger Dienstleistungen kann mehrere Millionen US-Dollar kosten und verheerende Folgen für die betroffenen Gemeinden haben.

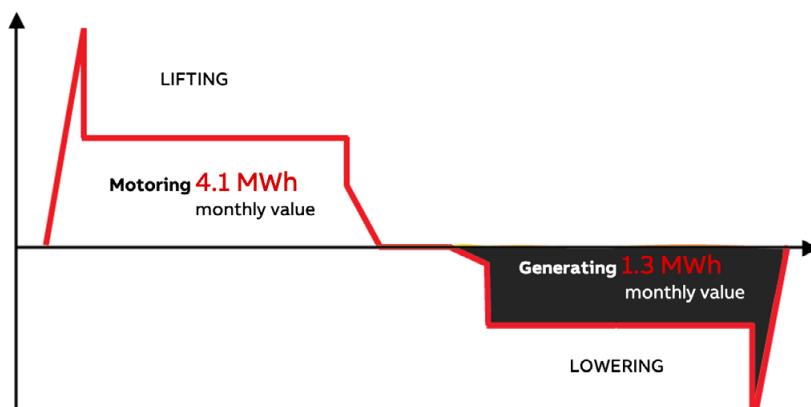
Die rückspeisefähigen ULH-Frequenzumrichter der ACS880-Familie von ABB bringen zusätzliche Vorteile für Anwendungen, bei denen eine Energierückspeisung sinnvoll ist.

Eine rückspeisefähige Variante des ULH-Frequenzumrichters bietet neben den vorgenannten Vorteilen die Möglichkeit zur Rückgewinnung der Energie, die beispielsweise bei Bremsvorgängen mechanischer Systeme erzeugt wird, und die bisher als Wärme in Bremswiderständen oder mechanischen Bremsen verloren geht. Diese Energie kann zum Beispiel in Kran- oder Aufzugsanwendungen genutzt werden. Mit einem rückspeisefähigen Frequenzumrichter kann eine Motoranwendung während des Bremsvorgangs als Generator arbeiten und die Energie wieder in das Netz oder zur späteren Verwendung in einen Akkumulator einspeisen.

Ein anderes Anwendungsbeispiel sind gelegentliche Bremsvorgänge, wenn es nicht darum geht, beim regulären Bremsen Energie zu sparen, sondern darum, eine Anwendung bei Bedarf so schnell wie möglich zu stoppen. Diese Art der Bremsung kann bei der Tunnelbelüftung zum Einsatz kommen, wo die Ventilatoren im Brandfall unter Umständen schnellstmöglich angehalten werden müssen, damit die Raugasausbreitung minimiert wird.

Eine Anwendung lässt sich auf ganz unterschiedliche Weise bremsen, beispielsweise mit Bremsstellern oder -widerständen, mit externen rückspeisenden Bremseinheiten oder mit Matrix-Frequenzumrichtern. Rückspeisefähigen ULH-Frequenzumrichtern wird jedoch aus verschiedenen Gründen der Vorzug gegeben.<sup>7</sup> Dazu zählen, neben der sehr geringen Oberschwingungserzeugung und der Energierückspeisung,

- Verbesserung der Systemeffizienz, weil die rückspeisefähige Einheit keine eigenständige Komponente sondern ein fest integrierter Bestandteil des Frequenzumrichters ist,
- verminderte Komplexität des Systems, weil keine Frequenzumrichter-externen Komponenten wie Bremssteller, Bremswiderstände oder eigenständige rückspeisefähige Einheiten erforderlich sind,
- Platzersparnis, weil alle Komponenten integriert sind,
- Verminderung des Klimatisierungsbedarfs im Kontrollraum im Vergleich zur Widerstandsbremse, da keine Energie als Wärme umgesetzt wird.



Das praktische Beispiel eines Abfallentsorgungs-krans mit 55-kW-Hubmotor, 9-kW-Kraftfahrtmotor, 4,5-kW-Katzfahrmotor und 25-kW-Greifermotor zeigt, dass bei Verwendung rückspeisefähiger Frequenzumrichter von ABB jährlich 32 % der Energiekosten eingespart werden können, was bei einem Strompreis von 0,15 €/kWh eine Kostenersparnis von 2.300 € bedeutet.

### Alternative Technologien zur Oberschwingungsdämpfung

Es gibt viele verschiedene Ansätze zur Reduzierung von Oberschwingungen in Stromnetzen mittels 6-Puls-Frequenzumrichtern. Sie alle wirken sich anders auf die Stromqualität des Netzes aus, und können die Energie- und Kosteneffizienz sowie die Nachhaltigkeit verbessern oder verschlechtern. Die Active Front-End-Technologie mit DC-Zwischenkreiskondensatoren gilt aus verschiedenen Gründen als der vorteilhafteste Ansatz. Der Hauptgrund liegt darin, dass Oberschwingungen gar nicht erst erzeugt werden, so dass keine zusätzliche Oberschwingungsdämpfung erforderlich ist.

Ein wesentlicher Aspekt ist die Oberschwingungsdämpfung, die bei Teillasten erreicht wird, da Anwendungen mit Frequenzumrichter überwiegend bei Teillast arbeiten. Die Active Front-End-Umrichter von ABB verursachen auch bei Teillasten nur sehr geringe Oberschwingungen, wohingegen beispielsweise Passivfilter bestimmten Einschränkungen unterliegen.

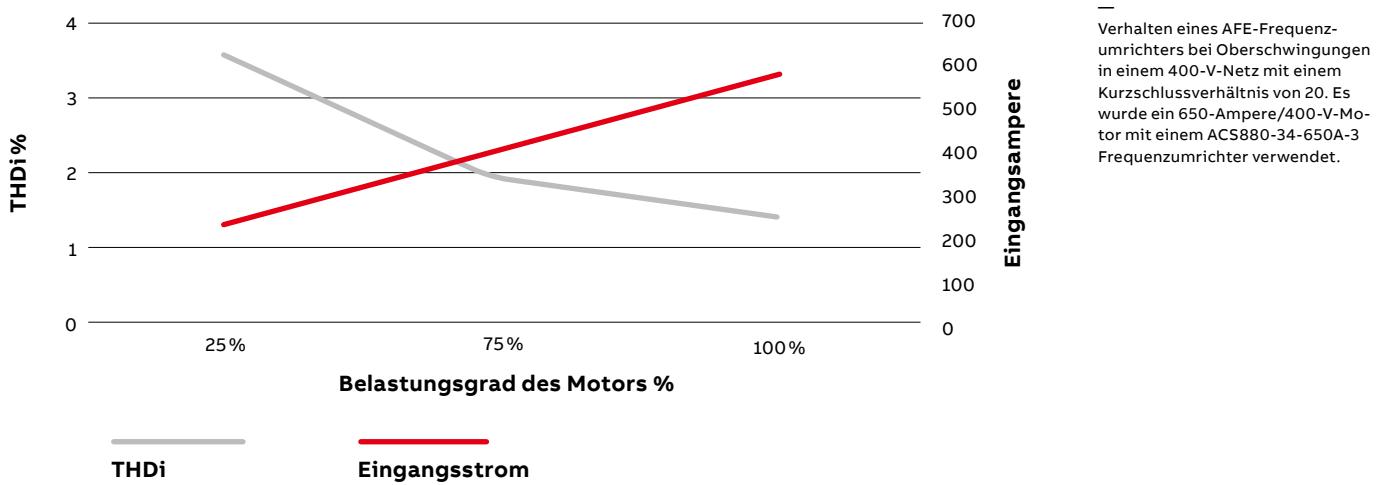
Passive Oberwellenfilter sind fest auf bestimmte einzelne Oberschwingungsfrequenzen abgestimmt. Um starke Verzerrungen durch eine Vielzahl von Oberschwingungsfrequenzen zu reduzieren, können mehrere parallel geschaltete Passivfilter eingebaut werden. Das bedeutet jedoch einen erhöhten Platzbedarf und Mehrkosten. Passive Filterlösungen werden meist auf einen Lastpunkt ausgelegt. Ändert sich das Lastprofil, müssen auch die installierten Passivfilter gewechselt werden.

Zu bedenken ist auch, dass die Kondensatoren von Passivfiltern bei Lasten unter 20 bis 30 Prozent abgeschaltet werden müssen, um negative Auswirkungen auf den Leistungsfaktor der Einrichtung und Probleme mit der Generatorspeisung zu vermeiden – was ihre Filterleistung beeinträchtigt.

Aktive Oberwellenfilter reduzieren Oberschwingungen sehr viel besser als passive Filter, da sie eine Vielzahl von Oberschwingungsfrequenzen im Netz erkennen und mit Hilfe ihrer integrierten IGBTs einen Kompensationsstrom liefern, der die von nichtlinearen Lasten erzeugten Oberschwingungsströme auslöscht. Mit der Last ändert sich jedoch auch ihre Filterleistung – bei 50 Prozent kann der THDi leicht 12-14 Prozent erreichen.

Multipuls-Frequenzumrichter sind eine weitere Methode, um Oberschwingungen abzuschwächen. Sie bieten mehr Gleichrichterdioden als Standard-6-Puls-Umrichter und reduzieren die Verzerrung durch Oberschwingungen deutlich - ihre Komplexität, der sehr große Platzbedarf und die erforderlichen Sondertransformatoren mit Phasenversatz sind jedoch entschiedene Nachteile dieser Technologie.

Im Bereich der Active Front-End-Frequenzumrichter sind verschiedene Technologien auf dem Markt. Neben Active Front-End-Umrichtern mit DC-Kondensatoren gibt es auch AFE-Frequenzumrichter ohne DC-Kondensatoren, sogenannte Matrix-Frequenzumrichter<sup>6</sup>. Der Verzicht auf Kondensatoren senkt zwar die Kosten, wirkt sich aber negativ auf



### Oberschwingungsanteil bei Nennlast mit verschiedenen Lösungen

	6-pulse rectifier without choke	6-pulse rectifier with choke	6-pulse drive with passive filter	6-pulse drive with active filter	Multi-pulse drive	Active front end drive
THDi and respective current waveform	>100%	~40%	<10%	<7%	6 to 10% (12 pulse) <6% (18-pulse)	<3%

die Leistung des Frequenzumrichters aus und führt zu Einschränkungen bei der bereitgestellten Ausgangsspannung, bei der Oberschwingungsdämpfung, dem Leistungsfaktor und bei der Power-Loss-Ride-Through-Funktion (Stromausfall durchfahren).

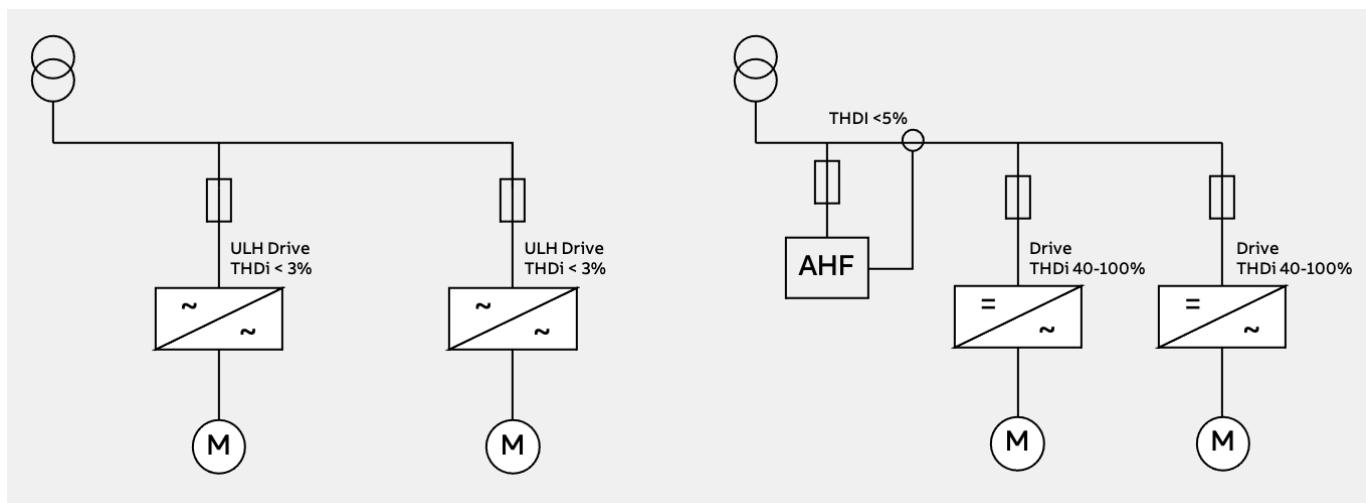
Ein AFE-Frequenzumrichter ohne Kondensator stellt bei geringer harmonischer Verzerrung mit einem THDi von etwa 5 % möglichweise nur 92 Prozent oder weniger Ausgangsspannung bereit. Motoren, die nicht mit der vollen Spannung versorgt werden, können bei voller Drehzahl das Nenndrehmoment nicht erreichen, ohne zusätzlichen Strom zu beziehen, um die fehlende Spannung auszugleichen. Das führt jedoch dazu, dass der Motor heißer läuft, was seine Lebensdauer verkürzt. Wenn Matrix-Frequenzumrichter dagegen die maximale Ausgangsspannung abgeben, kann die Stromverzerrung bis zu 10 Prozent erreichen. Das liegt über dem allgemein akzeptierten Industriestandard für oberschwingungsarme Frequenzumrichter von 5 % THDi, der sich bei direkter Anwendung der strengen Norm IEEE 519 auf den Frequenzumrichter ergibt.

AFE-Frequenzumrichter mit DC-Zwischenkreiskondensatoren haben dieses Problem nicht. Sie liefern die volle Motorspannung und schwächen Oberschwingungen auf ein Minimum ab.

Beim Vergleich verschiedener Technologien zur Oberschwingungsdämpfung muss auch berücksichtigt werden, wie sie

sich auf die Systemeffizienz auswirken. Active Front-End-Umrichter sind wegen der zusätzlich integrierten aktiven Einspeiseeinheit (IGBTs) weniger effizient als konventionelle 6-Puls-Lösungen. Dabei werden aber oft die Verluste übersehen, die dem System durch Oberwellenfilter entstehen, die Oberschwingungen vergleichbar gut reduzieren. Tatsächlich sind die Gesamtverluste in Systemen mit Ultra-Low Harmonic Drives nicht höher oftmals sogar geringer, und sie bieten gegenüber eigenständigen Oberwellenfiltern den zusätzlichen Vorteil eines Leistungsfaktors von eins. AFE-Frequenzumrichter mit DC-Zwischenkreiskondensatoren können die volle Motornennspannung bereitstellen.

Für Gruppeninstallationen (ein Filter für mehrere Frequenzumrichter) wird wegen der besseren Kosteneffizienz oft die Verwendung von aktiven Oberwellenfiltern (AHF) empfohlen. Der aktive Filter ist damit in der Lage die Oberwellen an einem bestimmten Anschlusspunkt zu kompensieren. Allerdings wird die Oberwellenbelastung zwischen dem aktiven Filter und den Frequenzumrichtern oftmals nicht ausreichend behandelt. Das bedeutet jedoch erhöhte Energieverluste im nachgelagerten Teil des Systems und eine verminderte Systemzuverlässigkeit. Hinzu kommt die Gefahr einer Systemüberlastung durch einen zu hohen Oberschwingungsanteil bei Ausfall eines zentralen AHF. Active Front-End-Frequenzumrichter erzeugen erst gar keine Oberschwingungen, so dass die Nachteile anderer Technologien zur Reduzierung von Oberschwingungen vermieden werden.

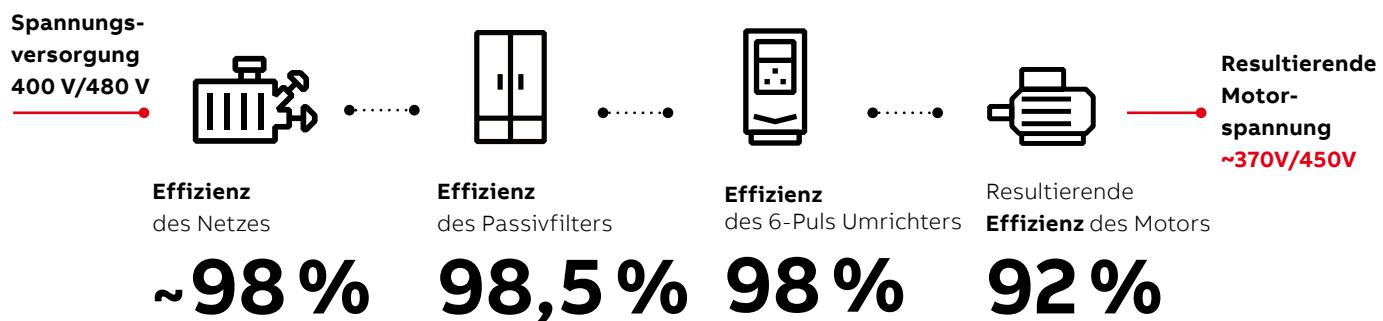


Oberschwingungsdämpfung in Systemen mit ULH-Frequenzumrichtern und einem aktiven Oberwellenfilter (AHF).

## Oberschwingungsdämpfung mit Passivfilter

Oberschwingungsgehalt bei Nennlast = 10 %

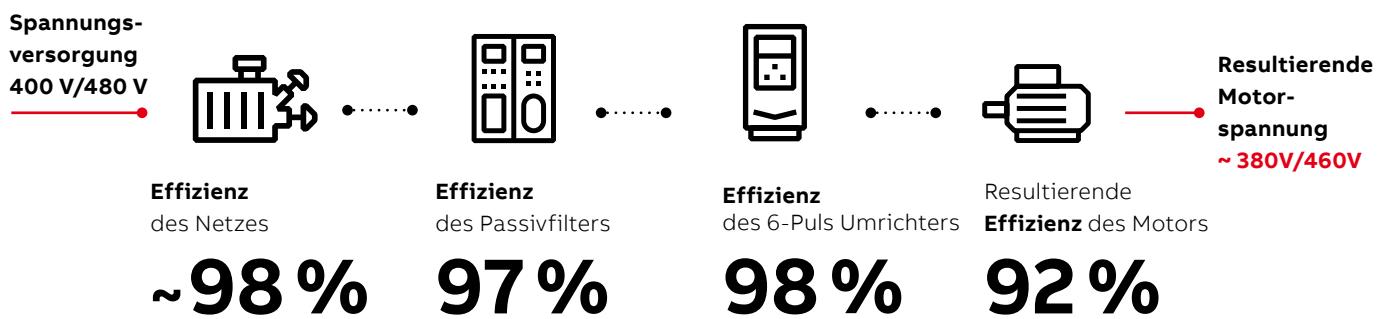
Systemeffizienz = 87 %



## Oberschwingungsdämpfung mit Aktivfilter

Oberschwingungsgehalt bei Nennlast = 5 %

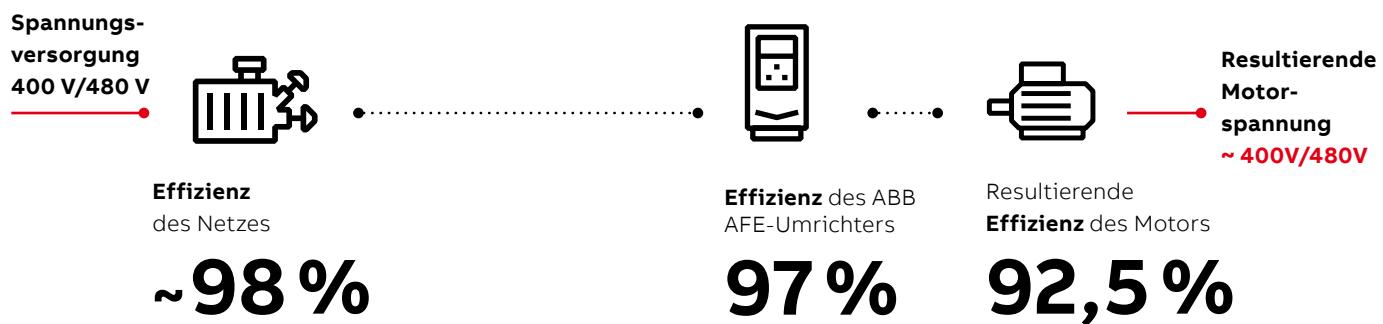
Systemeffizienz = 85,7 %



## Oberschwingungsdämpfung mit Active Front-End-Frequenzumrichtern

Oberschwingungsgehalt bei Nennlast = 3 %

Systemeffizienz = 87,9 %



# Fazit

Mit Frequenzumrichtern lässt sich viel Energie einsparen, weil sie die Motor-drehzahl an die Anforderungen der Anwendung anpassen. Einige Frequenzumrichter-Technologien können jedoch die Stromqualität im Netz negativ beeinflussen, was die Systemeffizienz und die Zuverlässigkeit beeinträchtigt und die Projektkosten in die Höhe treibt. Dies sollte vor jeder endgültigen Entscheidung bedacht werden.

Auf der Active Front-End-Technologie basierende Frequenzumrichter mit DC-Zwischenkreiskondensatoren sind die optimale Lösung für Systeme, die sehr empfindlich auf Oberschwingungen reagieren, wie es bei ausfallkritischen Anlagen typisch ist. Diese Frequenzumrichter stellen nicht nur die Effizienz des Prozesses selbst sicher, sie gewährleisten auch die Effizienz des Stromnetzes und tragen zu einer kontrollierten Prozesszuverlässigkeit bei. Durch Ultra-Low Harmonic Drives mit Active Front-End lassen sich Kapital- und Betriebskosten deutlich senken, was sie zur bevorzugten Wahl von Unternehmern und Versorgern macht.

- (1) Technical guide No. 6 Guide to harmonics with AC drives, ABB Drives 2017.
- (2) Commercial Buildings Energy Consumption Survey, EIA 2016.
- (3) Manufacturing Energy Consumption Survey – Dairy industry, EIA 2010.
- (4) Proposed requirements and proposed effective dates for the first edition of the standard for dry-type general purpose and power transformers UL1561, Underwriters Laboratories 1991.
- (5) The Cost of Downtime, Gartner Research 2014.
- (6) Active front end drive technologies, ABB Drives 2019.
- (7) Technical guide No. 8 Electrical braking, ABB Drives 2018.

—  
Weitere Informationen erhalten Sie von Ihrer  
ABB-Vertretung oder im Internet:

**[new.abb.com/drives/de](http://new.abb.com/drives/de)**

**[new.abb.com/motors-generators/de](http://new.abb.com/motors-generators/de)**

**[new.abb.com/plc/de](http://new.abb.com/plc/de)**