

Forschungsprojekt DC-INDUSTRIE:

# Gleichspannungsnetze in der industriellen Produktion

# Gleichstrom

Elektrische Energiespeicher

Stromversorgung

# Industrie

Automation Smart Grid

# Energiewende

DC-Versorgung

Industrielle Produktion

## Über das Forschungsprojekt DC-INDUSTRIE

Das Projekt „DC-INDUSTRIE – Intelligentes offenes DC-Netz in der Industrie für hoch-effiziente Systemlösungen mit elektrischen Antrieben“ hat ein Gesamtvolumen von rund zehn Millionen Euro. Es wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert und hat eine Laufzeit von drei Jahren.

Insgesamt 21 Unternehmen aus der Industrie, vier Forschungsinstitute und der ZVEI arbeiten im Projekt gemeinsam daran, die Energiewende in der industriellen Produktion umzusetzen und dafür mehr Energieeffizienz und Energieflexibilität in die industrielle Produktion zu bringen.

Die 15 Verbundpartner – Siemens, Bauer Gear Motor, Baumüller, Bosch Rexroth, Daimler, Danfoss, Eaton, KHS, Lenze, LTI Motion, Weidmüller, Fraunhofer IISB, Fraunhofer IPA, Hochschule Ostwestfalen-Lippe, Universität Stuttgart – arbeiten gemeinsam mit den elf assoziierten Partnern – ABB Stotz-Kontakt, E-T-A Elektronische Apparate, Harting, Homag Group, Jean Müller GmbH Elektrotechnische Fabrik, Leoni Special Cables, Phoenix Contact, SEW-PowerSystems, U.I. Lapp, Yaskawa – und dem ZVEI im branchenübergreifenden Forschungsprojekt DC-INDUSTRIE an mehr Energieeffizienz und Energieflexibilität in der industriellen Produktion.



### **Forschungsprojekt DC-INDUSTRIE: Gleichspannungsnetze in der industriellen Produktion**

Herausgeber:

Forschungsprojekt DC-INDUSTRIE  
c/o ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-  
und Elektronikindustrie e.V.  
Lyoner Straße 9  
60528 Frankfurt am Main

Verfasser und Ansprechpartner:

Karl-Peter Simon, Bauer Gear Motor  
Telefon: +49 711 3518-0  
E-Mail: [automation@zvei.org](mailto:automation@zvei.org)

September 2017

Trotz größtmöglicher Sorgfalt übernimmt DC-Industrie keine Haftung für den Inhalt. Alle Rechte, insbesondere die zur Speicherung, Vervielfältigung und Verbreitung sowie der Übersetzung, sind vorbehalten.



Unter Mitarbeit von:

ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-  
und Elektronikindustrie e.V.  
Fachverband Automation  
Lyoner Straße 9  
60528 Frankfurt am Main  
Telefon: +49 69 6302-0  
Fax: +49 69 6302-317  
E-Mail: [automation@zvei.org](mailto:automation@zvei.org)  
[www.zvei.org](http://www.zvei.org)

# 70 Prozent des industriellen Stromverbrauchs entfallen auf Elektromotoren

In den 1970er-Jahren startete die dritte industrielle Revolution. Damals standen die weitere Automatisierung durch Elektronik und die IT im Fokus. Zunehmend wurden speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) zum Steuern von Industrieanlagen und Prozessen in Verbindung mit Frequenzumrichtern eingesetzt, um Produktivität und Energieeffizienz weiter zu erhöhen.

Der Frequenzumrichter ermöglichte die stufenlose Drehzahlsteuerung des Elektromotors und trug so dazu bei, den Produktionsprozess zu optimieren und elektrische Energie zu sparen. Heute werden ca. 35 Prozent aller neu verkauften Drehstrom-Asynchronmotoren mit Frequenzumrichtern gesteuert.

In der Industrie sind Elektromotoren mit einem Stromverbrauchsanteil von ca. 70 Prozent die bedeutendsten elektrischen Verbraucher. Die Reduzierung des Energiebedarfs durch Effizienzsteigerung bei diesen Antriebssystemen trägt gleichermaßen zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei. Das Europäische Parlament hat deshalb erstmalig mit der Ökodesign-Richtlinie 2005/32/EG und der Nachfolgerichtlinie 2009/125/EG Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchs-

relevanter Produkte erlassen. Die Umsetzung dieser Anforderungen wurde für Elektromotoren in der Verordnung (EG) 640/2009 umgesetzt.

Als Zugangsvoraussetzung für den europäischen Markt gilt seit dem 1. Januar 2017 für Motoren mit einer Bemessungsleistung von 0,75 bis 375 kW die Energieeffizienzklasse IE3 und für Betrieb mit Frequenzumrichter (VSD) als Alternative IE2 (siehe Bild 1). In der internationalen Norm IEC 60034-30-1 sind Wirkungsgradklassen von IE1 bis IE4 für Elektromotoren, die für Netzbetrieb ausgelegt sind, definiert. Diese Wirkungsgradklassen sind für den Bemessungspunkt bei Nenndrehzahl und Nenndrehmoment eines Drehstrom-Asynchronmotors festgelegt. Die Erfahrung hat jedoch gezeigt, dass eine Energieeffizienzregulierung einer Komponente nur in bestimmten Betriebsarten nachhaltig Energie reduziert. Eine ökologische Betrachtungsweise sollte den Blick daher auf das komplette Antriebssystem legen. Dies ist eine Voraussetzung, um nachhaltige Wettbewerbsfähigkeit und Arbeitsplätze langfristig zu sichern.

Bild 1: Die gesetzlichen Verordnungen für Elektromotoren

Stufe 3	2017	1. January	IE3	IE2*	
	2016		0,75 ... 375 kW 2, 4, 6 pole	0,75 ... 375 kW 2, 4, 6 pole	
Stufe 2	2015	1. January	IE3	IE2*	
	2014		7,5 ... 375 kW 2, 4, 6 pole	7,5 ... 375 kW 2, 4, 6 pole	
				*use with VSD only	
Stufe 1	2012	16. June	IE2		
	2011		0,75 ... 375 kW 2, 4, 6 pole		

Die gesetzlichen Verordnungen erfordern für Europa seit 2011 den Einsatz von Motoren mit höherem Wirkungsgrad IE2 und IE3

Mit dem Projekt DC-INDUSTRIE wird ein neuer Ansatz erforscht: Eine veränderte Netzinfrastruktur, die auf Gleichspannungsnetzen basiert, soll sowohl die Energiewende voranbringen und Energieeffizienz fördern als auch Industrie 4.0 unterstützen. Das Projekt „DC-INDUSTRIE – Intelligentes offenes DC-Netz in der Industrie für hoch-effiziente Systemlösungen mit elektrischen Antrieben“ hat ein Gesamtvolumen von rund zehn Millionen Euro. Es wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert und hat eine Laufzeit von drei Jahren.

Um die Bedeutung dieses Projekts zu verdeutlichen, werden nachfolgend zunächst die Begrenzungen der heutigen Wechselstromnetze im industriellen Umfeld betrachtet.

## Der Status Quo: Rückspeisung von Bremsenergie nur begrenzt möglich

Unsere heutige Elektrizitätserzeugungsstruktur basiert auf Kraftwerken, die in das Versorgungsnetz einspeisen. Über den Betrieb von Fernleitungen, Verbundnetzen und Lastverteilern erfolgt die Verteilung an den Verbraucher. Die Energieproduktion und -verteilung ist hierarchisch strukturiert. Der Energiefluss geht in eine Richtung – vom Erzeuger zum Verbraucher.

Durch den zunehmenden Einsatz von dezentraler Stromerzeugung, wie zum Beispiel Solarenergie und Windkraft, hat sich diese Struktur geändert. Bisher wurde die Kraftwerksleistung gezielt an den Energiebedarf angepasst. Insbesondere die erneuerbaren Energieerzeuger tragen dazu bei, dass die verfügbare elektrische Energieerzeugung sehr stark schwanken kann. Als Folge muss die notwendige Grundlastleistung sehr hoch sein, um Versorgungssicherheit gewährleisten zu können. Mit den heutigen Strukturen sind also Erzeugungskapazitäten vorhanden, die nicht effizient genutzt werden können, da Kapazität auf Erzeuger- und Bedarf auf Verbraucherseite nur sehr schwer aneinander anpassbar sind. Insofern benö-

tigt man in der Zukunft intelligente Netze (Smart Grids), die sich selbst stabilisieren und so eine Optimierung ermöglichen zwischen verfügbarer elektrischer Energie und dem jeweils notwendigen Bedarf.

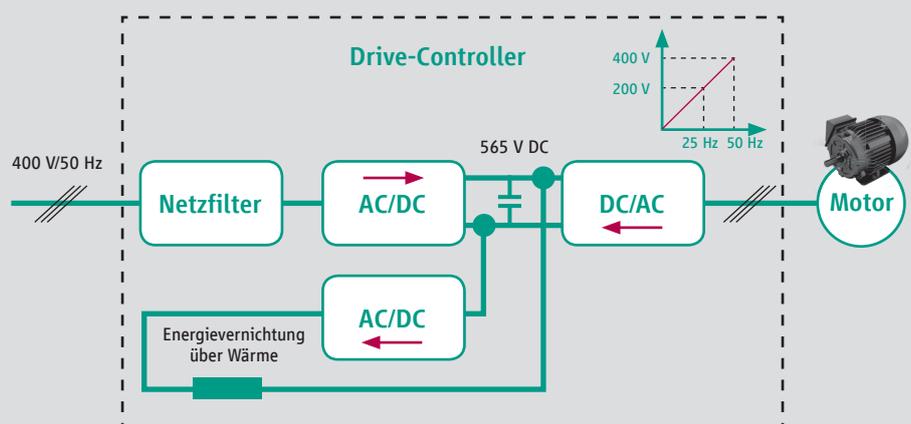
Motoren, die nur eine konstante Drehzahl erfordern, können direkt an das Wechselspannungsnetz angeschlossen werden. Elektromotoren mit einem vorgeschalteten Frequenzumrichter können die Drehzahl der Antriebe elektronisch verändern. Der Vorteil bei Einsatz eines Frequenzumrichters ist die kontinuierliche Anpassungsmöglichkeit der Motordrehzahl an den aktuellen Bedarf, was sehr oft auch zu Energieeinsparungen führt. Ein Frequenzumrichter wird von der Wechselspannung versorgt. Diese wird zunächst über einen Gleichrichter (B6-Gleichrichter – siehe Bild 2) in eine Gleichspannung umgewandelt, die dann über einen nachgeschalteten Wechselrichter in eine Wechselspannung mit variabler Frequenz und Spannung umgewandelt wird, um so die Drehzahl eines Drehstrommotors elektronisch zu verändern. Arbeitet jedoch der Drehstrommotor im Bremsbetrieb,

zum Beispiel bei einem Kran im Senktrieb, dann ändert sich der Energiefluss. Diese Energie kann jedoch der Frequenzumrichter nicht in das Netz zurückspeisen, da der Eingangsgleichrichter den Energiefluss nur in eine Richtung ermöglicht. Deshalb muss die zurückgespeiste Energie über den Gleichspannungszwischenkreis des Frequenzumrichters abgeführt werden. Dazu wird ein Bremschopper am Zwischenkreis angeschlossen. Dieser überwacht die Zwischenkreisspannung bezüglich der Spannungshöhe. Überschreitet die Zwischenkreisspannung einen eingestellten Schwellwert, schaltet der Bremschopper den Bremswiderstand zwischen den positiven und den negativen Pol des Zwischenkreises. Dies ist in der Regel ein zusätzlicher externer Bremswiderstand, der die Bremsenergie in „Wärme“ umwandelt – eine Lösung, die heute für Antriebe mit einer Leistung kleiner 30 kW verwendet wird. Bei größeren Rückspeiseleistungen wird ein zusätzlicher Wechselrichter eingesetzt, um die Bremsenergie in das Versorgungsnetz zurückzuführen.

## Netzurückwirkungen begrenzen den Einsatz von Frequenzumrichtern

Heute werden zunehmend Frequenzumrichter zur Drehzahlsteuerung eingesetzt. Allerdings ergeben sich bei steigendem Einsatz Netzurückwirkungsprobleme, die Oberschwingungen verursachen und die Spannung verzerren. Die Ursache hierfür sind Eingangsgleichrichter, die Wechselspannung in Gleichspannung umwandeln und dabei Oberschwingungen im Netz bewirken (Bild 3). Um die Spannungsverzerrung innerhalb zulässiger Werte zu begrenzen, gibt es daher passive und aktive Filter – auch zum Nachrüsten. Steigt jedoch die Anzahl der Geräte am Netz mit Eingangsgleichrichtern wie Frequenzumrichtern, LED-Leuchten, PCs und Netzteilen, dann steigt auch das Problem der Netzurückwirkungen; das erfordert sehr oft den nachträglichen Einsatz von zusätzlichen Netzfiltern. Es gibt für Oberschwingungen keine Standardlösung, da jedes Netz und seine Verbraucher sehr unterschiedlich sind. Letztendlich ist der

Bild 2: Heutige Struktur zur Drehzahlregelung von Elektromotoren mit Bremsenergie

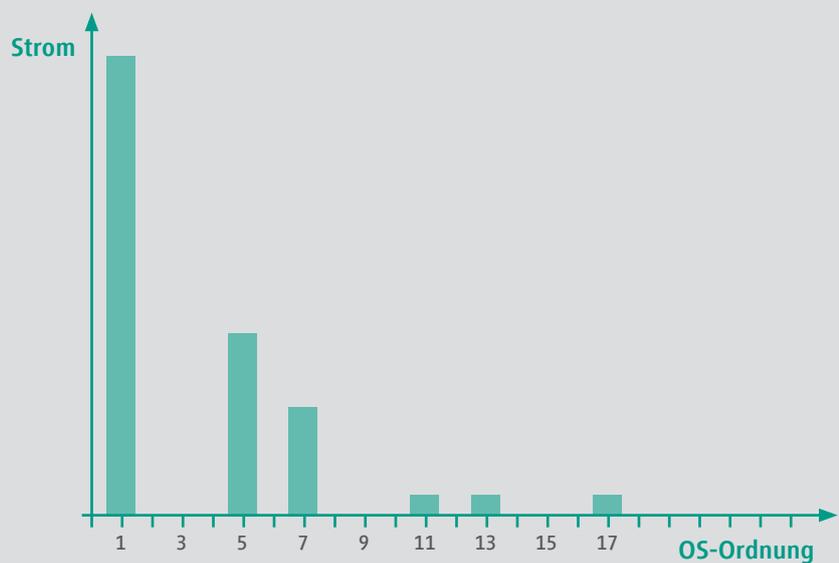


- Motoren im Generatorbetrieb, wie z. B. bei Hubantrieben, können mit einem zusätzlichen Bremswiderstand betrieben werden
- Die Verlustleistung im Senkbetrieb wird im Bremswiderstand verheizt

Betreiber für die Spannungsqualität seiner Produktionsstätte verantwortlich. Herausforderung ist, die Spannungsqualität nach EN 50160 an der Übergabestelle zur Kundenanlage einzuhalten. Werden zunehmend Frequenzumrichter oder andere Geräte mit Leistungselektronik installiert, nehmen Netzurückwirkungen zu und beeinflussen damit auch das öffentliche Netz.

Antrieben mit häufigen Start-Stopp-Zyklen sogar zu einem höheren Energieverbrauch führen kann. Insofern erfordert Energieoptimierung immer eine genaue Kenntnis der Anwendung, denn nur so können Energieeffizienz und Gesamtkosten (Investitions- und Betriebskosten) optimiert werden.

Bild 3: Oberschwingungsanalyse (Beispiel)



### Bisherige Gesetze und Standards berücksichtigen nicht den realen Betrieb eines Elektromotors

Um den Wirkungsgrad einer Komponente wie zum Beispiel eines Elektromotors zu klassifizieren, wurde ein definierter Arbeitspunkt festgelegt. Es handelt sich also um einen Betriebspunkt, der sehr oft von den realen Lastbedingungen abweicht. Um eine höhere Energieeffizienzklasse zu erreichen, wird sehr häufig ein größerer Materialeinsatz erforderlich, was eine Erhöhung der Herstellkosten mit sich bringt; außerdem kann sich dadurch das Massenträgheitsmoment eines Elektromotors erhöhen, was bei

### Integration des Frequenzumrichters in den Motor

Aufgrund der hohen Aufwendungen für Netzfilter und Spannungsgleichrichter werden sehr viele zusätzliche Maßnahmen für einen Frequenzumrichter benötigt. Diese benötigen Platz und verursachen höhere Kosten. Für jeden Umrichter ist eine separate Spannungswandlung von Wechselspannung zu Gleichspannung notwendig – auch das verursacht Zusatzverluste. Deshalb war es bisher sehr schwierig, einen Frequenzumrichter so kompakt zu konzipieren, dass die Elektronik in den Motor integriert werden kann. Aus diesem Grund werden bis-

her die meisten Frequenzumrichter in den Schaltschrank eingebaut und über ein abgeschirmtes Leistungskabel mit dem Drehstrommotor verbunden. Wegen der hohen Schaltfrequenzen von kleiner 4 kHz entstehen zusätzliche kapazitive Kabelverluste, die besonders bei langen Motorkabeln nicht vernachlässigbar sind. Die Abschirmung verursacht aber wiederum höhere Kabel- und Installationskosten. Wenn nun der Frequenzumrichter einfacher in den Motor zu integrieren wäre, könnte diese Problematik durch eine kurze Verbindung zwischen Motor und Frequenzumrichter verringert werden.

### **Kurzunterbrechungen können zu Produktionsausfällen führen**

Produktionsanlagen werden zunehmend mit elektronisch gesteuerten Bewegungsabläufen und durch den Einsatz von Robotern automatisiert. Sehr oft sind dies elektronisch synchronisierte Bewegungsabläufe, die in jedem Betriebszustand sicher kontrolliert werden müssen. Kurzfristige Spannungsausfälle können die Versorgung der Antriebe unterbrechen, was zu Produktionsausfällen und Fehlproduktion führen kann. Insofern sind stabile Stromversorgungsnetze für solche Produktionseinrichtungen eine Grundvoraussetzung. Leider zeigt die Praxis, dass insbesondere durch die Veränderung der Stromerzeugungsstrukturen das Problem der Netzstabilisierung eine zunehmende Herausforderung darstellt.

Die aufgezeigten Herausforderungen zeigen, dass ein vermehrter Einsatz von Umrichtern zur flexiblen Steuerung von Elektromotoren wünschenswert und sehr oft sogar notwendig ist. Denn nur so können sowohl die Produktionsprozesse als auch die Energieeffizienz weiter verbessert werden. Netzurückwirkungen und Gerätekosten begrenzen jedoch diese Entwicklung. Da die

Bremsenergie in vielen Fällen nicht in das Netz zurückgespeist wird, sind erhebliche Energieeffizienzpotenziale vorhanden, die zukünftig genutzt werden müssen. Solange aber eine anwendungsoptimierte Energieeffizienzverbesserung nicht stattfindet, verursacht die heutige europäische und auch internationale Gesetzgebung sehr oft höhere Kosten für Energieeffizienzmotoren.

Um signifikante Fortschritte in Energieeffizienz und Systemkostenoptimierung zu erreichen, sind neue Ansätze notwendig. Automatisierung und Digitalisierung erfordern eine stabile Netzversorgung. Die Zunahme von dezentralen Netzeinspeisungen mit wechselnden Einspeiseleistungen hat jedoch diese Thematik verschärft. Um sowohl Energieeffizienz und Energiewende als auch Industrie 4.0 zu ermöglichen, sind neue Netzstrukturen erforderlich. Deshalb hat der ZVEI das Forschungsprojekt DC-INDUSTRIE initiiert.

Durch die Einführung eines zentralen Gleichspannungsnetzes (DC-Netz) soll die Voraussetzung geschaffen werden, um auch Energieeffizienz – unter Berücksichtigung optimierter Systemkosten – signifikant weiter zu erhöhen. Damit wird eine Netzinfrastruktur geschaffen, die den wirtschaftlichen Einsatz von Frequenzumrichtern weiter vermehrt. Smart Grids sollen wesentlich einfacher stabilisiert und optimiert werden, um die Verfügbarkeit von flexibler Produktion weiter zu steigern. Nun werden auch Antriebe mit integrierter Elektronik (z. B. Frequenzumrichter) möglich und liefern viele Informationen von allen Antrieben, die am DC-Netz betrieben werden. Damit können Energiedaten mit den Prozessdaten verknüpft werden. Unter Einbindung aller aktiven Teilnehmer werden über das Netzmanagement zusätzlich Informationen über den Energiezustand zur Verfügung gestellt. Dies ermöglicht eine energieeffizienteste Betriebsführung, die

Services in der Cloud unterstützen können, da dort Informationen unterschiedlicher Teilnehmer mit Produktionsdaten und zukünftigem Energiebedarf zusammenlaufen. Das Netzmanagement kann unter Berücksichtigung aller relevanten Informationen eingreifen und optimieren. Hinzu kommt die Möglichkeit von Analysen im Energiebezug und, damit verbunden, das

Erkennen von präventiven Maßnahmen, um möglichen Ausfällen vorzubeugen – beispielhaft etwa das rechtzeitige Aufladen von Speichern für die Pufferung von kritischen Lastzuständen. Nachfolgend wird erläutert, welche Verbesserungspotenziale im Rahmen des Forschungsprojekts DC-INDUSTRIE betrachtet werden und welche Ziele damit erreicht werden sollen.

## DC-INDUSTRIE: Vorteile der Gleichspannungsnetze für die industrielle Produktion

### Reduktion der Wandlungsverluste

Die neue Netzstruktur basiert auf einer Wechselspannungseinspeisung, die über einen zentralen Gleichrichter die Gleichspannungsversorgung für die Produktionsanlagen zur Verfügung stellt. Aktive Netzfilter sind im zentralen Gleichrichter integriert, um die notwendige Spannungsqualität zu sichern. Frequenzrichter verfügen üblicherweise über einen integrierten Gleichrichter mit Netzfilter, der stets eine verlustbehaftete Wandlung der elektrischen Energie von Wechsel- zu Gleichspannung notwendig macht. Durch die direkte Versorgung des Frequenzrichters mit Gleichspannung können alle dezentralen Energiewandlungen entfallen. Da eine zentrale Energiewandlung (von AC auf DC) wesentlich effizienter ist, werden Wandlungsverluste signifikant reduziert (Bild 4).

### Erhöhung der Effizienz durch direkten Energieausgleich

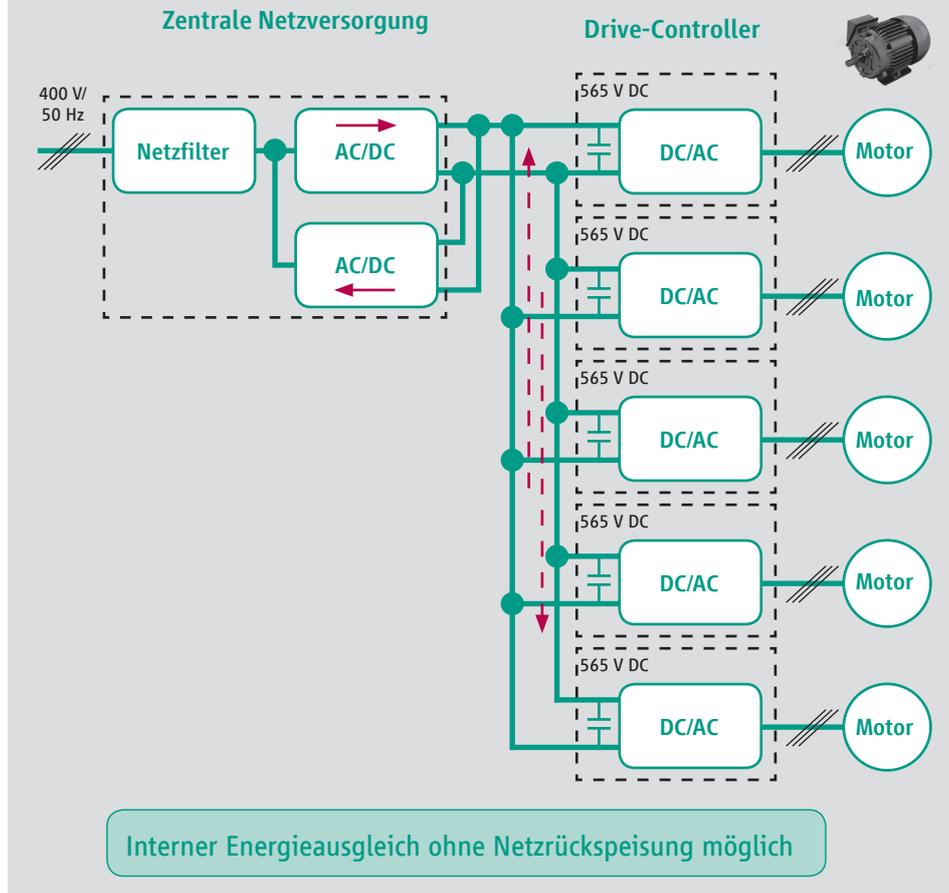
Durch die direkte Versorgung aller Elektromotoren über einen Frequenzrichter mit Gleichspannung sind alle installierten Motoren über ein gemeinsames Gleichspannungsnetz verbunden. Somit kann ein

direkter Energieausgleich aller treibenden und bremsenden Antriebe stattfinden. Die zentrale Gleichspannungsversorgung speist nur noch die Differenzenergie ein und muss auch nur diese von Wechselspannung auf Gleichspannung wandeln (Bild 4). Zusätzliche Komponenten, wie zum Beispiel Bremswiderstände, die Energie verheizen, entfallen. Damit müssen weniger Komponenten installiert werden und es wird Platz eingespart. Ein Gleichspannungsnetz verursacht im Wesentlichen nur ohmsche Übertragungsverluste. Gegenüber einem Wechselspannungsnetz entfallen die kapazitiven und induktiven Leitungsverluste.

### Smart Grid in der industriellen Produktion: stabile und robuste Netzversorgung

Ein zentrales Gleichspannungsnetz kann über Energiespeicher wesentlich einfacher gepuffert werden, um Netzunterbrechungen zu vermeiden (Bild 5). Damit kann das Fabriknetz stabilisiert und Spannungsschwankungen können leichter ausgeglichen werden. Zusätzlich können in kritischen Situationen Verbraucher als Generatoren eingesetzt werden, um das Netz zu stützen. Dies können Antriebe mit großen Schwungmassen sein, zum Beispiel

Bild 4: Netzstruktur für Drive-Controller mit Gleichspannungseinspeisung



Lüfter, die kurzzeitig im Produktionsprozess nicht erforderlich sind. Weiterhin bietet das zentrale Gleichspannungsnetz die Möglichkeit, Fotovoltaik direkt auf Gleichspannungsebene einzubinden. Auch in diesem Fall entfällt die Wandlung über einen Wechselrichter von DC auf AC. Diese Netzinfrastruktur bietet die Möglichkeit, den Energiebezug zu optimieren, um so den Strom möglichst günstig einzukaufen und das Netz zu stabilisieren.

### Flexibilisierung der Produktion unterstützt Industrie 4.0

Durch den Wegfall des Eingangswandlers und des Netzfilters bei Frequenz-

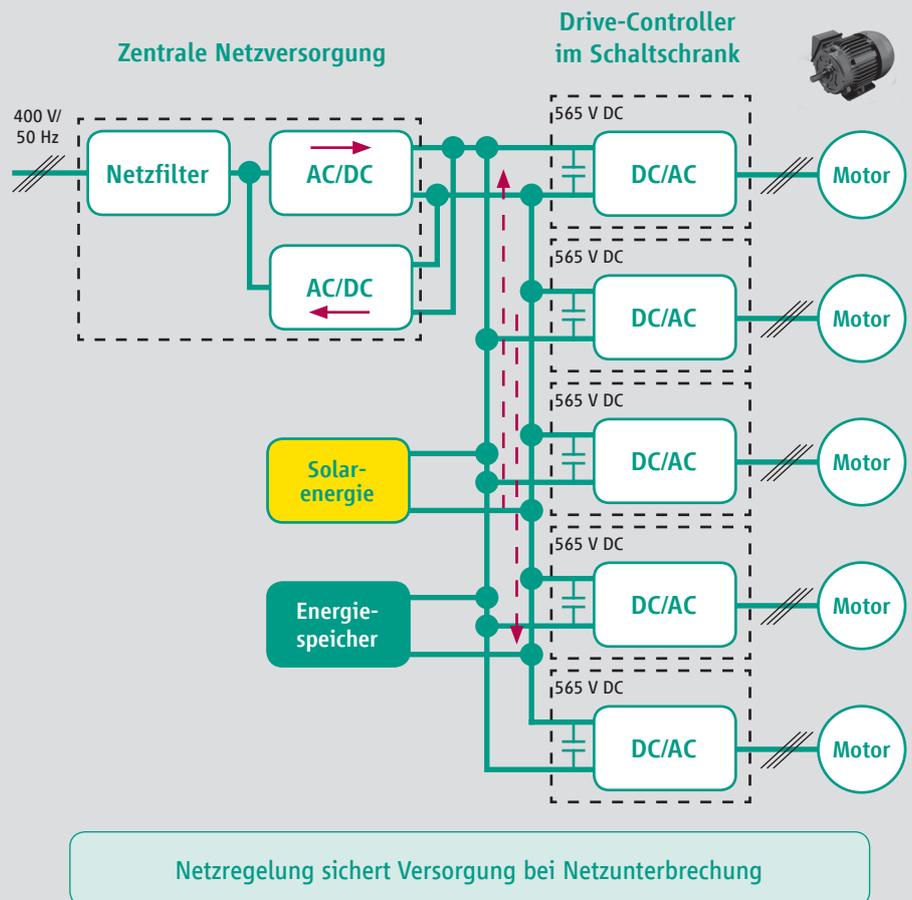
umrichtern können diese kostengünstiger und kompakter konzipiert werden. Damit ist eine einfachere Integration in den Motor möglich, was den Akzeptanzgrad wesentlich steigern kann. Drehzahlveränderbare Motoren ermöglichen Variantenreduktion und Energieeinsparungen. Sie liefern Zustandssignale von allen DC-gespeisten Antrieben, die für eine flexible und sichere Produktionssteuerung von großer Bedeutung sind. Durch das Netzwerkmanagement wird eine energiekostenoptimierte Betriebsführung möglich. Die zugänglichen Informationen erlauben präventive Produktionssteuerungsmaßnahmen, die die Verfügbarkeit der Produktion wesentlich erhöhen. Dies ist eine Voraussetzung, um Industrie 4.0 erfolgreich umzusetzen.

## Vereinfachung der elektrischen Installation

Da Leitungsverluste sinken und Umrichter kompakter werden, kann die Leistungselektronik näher am Motor montiert oder sogar in ihm integriert werden. Damit können die Kosten für teure abgeschirmte Motorleitungen entfallen. Besonders die hohen kapazitiven Verluste der Motorleitungen zwischen Umrichter und Motor sind in solchen Strukturen nicht mehr relevant – im Gegensatz zu den heutigen Anlagenkonzeptionen mit langen Motorleitungen.

Das Forschungsprojekt DC-INDUSTRIE wird die beschriebenen Möglichkeiten erforschen – mit dem Ziel, den Weg zur Einführung eines DC-Netzes nach dem Projektende 2019 zu ermöglichen. Der ZVEI mit seinen Mitgliedern unterstützt dieses Projekt, da es sowohl die Energiewende in Deutschland als auch Industrie 4.0 befördert. Somit wird dies ein wichtiger Baustein zur Sicherung unserer globalen Führungsposition in der Automation sein.

Bild 5: Netzstruktur für Gleichspannung –  
Einspeisung mit Energiestabilisierung







Forschungsprojekt DC-INDUSTRIE  
c/o ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik-  
und Elektronikindustrie e.V.  
Lyoner Straße 9  
60528 Frankfurt am Main  
Telefon: +49 69 6302-0  
Fax: +49 69 6302-317  
E-Mail: [zvei@zvei.org](mailto:zvei@zvei.org)  
[www.zvei.org](http://www.zvei.org)