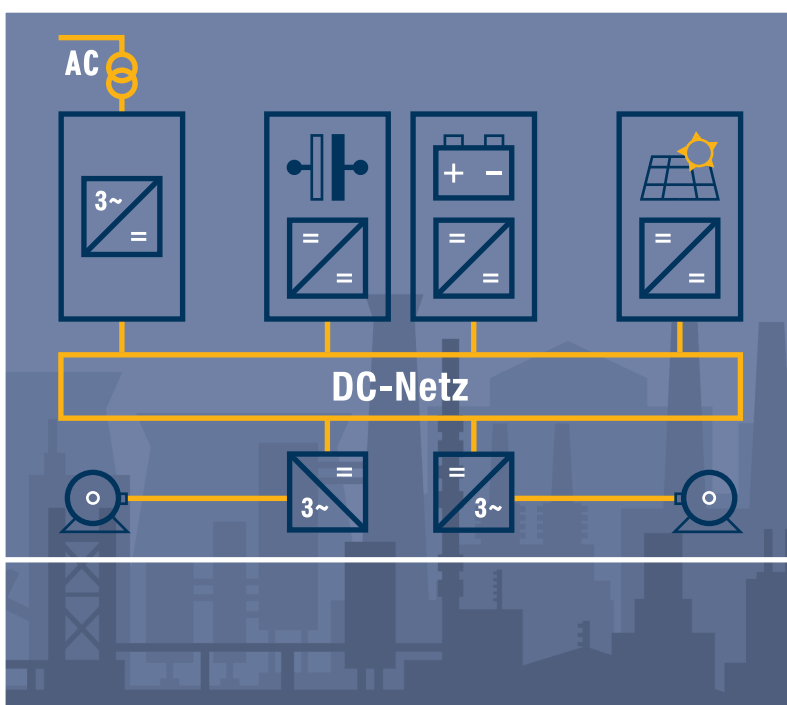


Alexander Sauer (Hrsg.)

Die Gleichstromfabrik

Energieeffizient. Robust.
Zukunftsweisend.



HANSER

Sauer (Hrsg.)

Die Gleichstromfabrik



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Alexander Sauer (Hrsg.)

Die Gleichstromfabrik

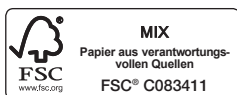
Energieeffizient. Robust. Zukunftsweisend.

Mit 108 Abbildungen und zahlreichen Tabellen

HANSER

Der Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Kfm. Alexander Sauer, Leiter des Instituts für Energieeffizienz in der Produktion (EEP)
und des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Herausgeber, Autoren und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Art aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Herausgeber, Autoren und Verlag die Gewähr dafür, dass beschriebene Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2020 Carl Hanser Verlag München, www.hanser-fachbuch.de

Lektorat: Dipl.-Ing. Volker Herzberg

Herstellung: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, www.rebranding.de, München

Titelmotiv: Johanna Nierich, unter Verwendung von Grafiken von © shutterstock.com/izabel

Coverrealisation: Max Kostopoulos

Satz: Kösel Media GmbH, Krugzell

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN: 978-3-446-46581-7

E-Book-ISBN: 978-3-446-46612-8

ePub-ISBN: 978-3-446-46613-5

Inhalt

Vorwort	VII
1 Gleichstrom kehrt zurück	1
2 Potenziale einer industriellen Gleichstromversorgung	9
2.1 Wandel vom AC-Netz zum DC-Netz	9
2.2 Teilautarke Energieversorgung durch Microgrids	16
2.3 Effiziente Energieversorgung	18
2.4 Ressourcenschonende Energieversorgung	22
2.5 Robuste und flexible Energieversorgung	25
2.6 Wirtschaftlicher Blick	30
2.7 Zusammenfassung	33
3 Anforderungen an die industrielle Energieversorgung	37
3.1 Anforderungen aus Anwendersicht	37
3.2 Resümee aus den Anforderungen	46
3.3 SWOT Analyse der DC-Technologie	48
4 Chancen für die Antriebstechnik	53
4.1 Herausforderungen und Funktionsweise beim AC-Verbund	55
4.2 Vom AC-Verbund zum DC-Verbund	57
4.3 Technische Bewertung	66
5 Systemkonzept eines fabrikinternen DC-Netzes	71
5.1 Topologie im DC-Netz	72
5.2 Parallelbetrieb von Versorgungsgeräten	78
5.3 DC-Spannungsband und Betriebsverhalten	83

5.4	Versorgungs- und Erdungskonzept	88
5.5	DC-Abzweig zum Entkoppeln und Schützen	92
5.6	Vorladungs- und Entladungskonzept	94
5.7	EMV-Konzept	104
5.8	Lebensdauer der Zwischenkreiskapazitäten	112
6	Netzmanagement	115
6.1	Teilnehmer am Netzmanagement	117
6.2	Möglichkeiten für eine Lastflusssteuerung	119
6.3	Empfehlungen zur Auslegung von Leistungsquellen im Kontext einer kennlinienbasierten Regelung	122
6.4	Umsetzungen einer dezentralen Gruppenregelung in der Praxis	129
6.5	Laderegelung von elektrochemischen Energiespeichern	134
7	Sicherheit im DC-Netz	139
7.1	Anforderungen an die Sicherheit	139
7.2	Anlagenschutz	144
7.3	Personenschutz	154
8	Planung und Auslegung einer Gleichstromfabrik	159
8.1	Relevante Gestaltungsobjekte in einer Gleichstromfabrik	159
8.2	Unterschiede in der Auslegung von DC- und AC-Netzen	162
8.3	Definieren des Planungsrahmens	166
8.4	Auslegen der Betriebsmittel	172
8.5	Ermitteln der Einstellungen der Wandlersysteme und Schutzgeräte	180
9	Umsetzungsbeispiele	187
9.1	CNC-Bearbeitungszentrum	187
9.2	Intralogistiksysteme	192
9.3	Elektrohängebahn	195
9.4	Karosserierohbau	197
10	Zusammenfassung und Ausblick	201
	Index	215

Vorwort

Das Buch „Die Gleichstromfabrik – Energieeffizient. Robust. Zukunftsweisend.“ gibt einen tiefen Einblick in die Herausforderungen, Technologien und Potenziale der DC-Technologie und regt dazu an, die elektrische Energieversorgung von Fabriken neu zu denken. Es soll Unternehmen dazu motivieren, die eigene Energieversorgung neu zu hinterfragen. Eine Vielfalt von Argumenten und Anreizen dafür finden sich in den nachfolgenden Kapiteln.

Erneuerbare Energien produzieren in der Regel Gleichstrom. Er wird in Wechselstrom gewandelt und ins Netz gespeist. Leistungselektronische Geräte in der Fabrik wandeln diesen dann wieder in Gleichstrom, um beispielsweise Elektromotoren anzutreiben. Auch Speicherlösungen arbeiten meist mit Gleichstrom. Transformationen von Gleich- zu Wechselstrom und umgekehrt schaden aber der Versorgungsqualität durch das schnelle Schalten der Leistungshalbleiter. In Industrieunternehmen kann dies zu EMV-Problemen und damit zu Produktionsschäden führen.

Hohe Qualität, Effizienz, Ressourcenschonung, Robustheit, geringe Energiekosten – dies sind dagegen die Merkmale einer Produktion in Gleichstromnetzen.

Eine Gleichstromfabrik braucht beispielsweise keine Wandlungsstufen in Frequenzumrichtern oder in PV-Wechselrichtern. Sie spart Bauteile ein und die verbleibenden Geräte werden kleiner. Auch an den Leitungen gibt es viel zu sparen. Im Gegensatz zum industriellen 3-phasigen AC-Netz ist das DC-Netz nämlich 2-phasig. Es entfallen somit ein, manchmal sogar zwei Leiter in der Verkabelung. Ein weiterer Effizienzeffekt: Die Bremsenergie von Elektromotoren kann leichter ins Netz zurückgespeist werden.

Das heutige DC-Netz kann als Smart-Grid den Leistungsfluss auf unterschiedliche Speicher und Verbraucher mittels dezentraler Echtzeitsteuerung aufteilen. Das macht die Versorgung mit Gleichstrom besonders robust und ergänzt die Ansätze der Industrie 4.0 im Bereich der industriellen Energieversorgung ideal. Eine Batterie kann beispielsweise die Anschlussleistung bei einer geringen Prozessdynamik reduzieren. Bei höherer Dynamik kann ein Kondensator kurzzeitige Leistungssprünge ausgleichen. Wird viel Leistung gebraucht, kann zusätzlich ein Schwung-

massespeicher ergänzt werden. Das Zusammenspiel dieser Technologien konnte bereits erfolgreich umgesetzt und erprobt werden.

Noch günstiger wird die Stromversorgung der Fabrik im DC-Netz, wenn zeitlich flexible Energietarife genutzt werden können. Das System kann dann nämlich durch eine übergeordnete Netzregelung die Arbeitspunkte der Speicher und steuerbaren Verbraucher verändern. So wird beispielsweise der Nutzungsanteil der selbst erzeugten Energie beeinflusst.

Dieses Buch zur **Gleichstromfabrik** greift alle wichtigen Fragen auf, die sich bei einem Wandel der Spannungsart von AC zu DC stellen. Experten erklären im Detail und doch für den interessierten Laien gut verständlich, wie die Gleichstromfabrik funktioniert, welche Potenziale sie erschließen kann, welche Technologien benötigt werden und wie sie umzusetzen ist.

Ich möchte allen beteiligten Unternehmen und insbesondere den vielen engagierten Fachexperten persönlich für ihre Arbeit an der ersten Umsetzung eines offenen DC-Netzes in industriellen Anlagen und für die Unterstützung bei der Erstellung dieses Buchs danken. Ein besonderer Dank gilt dem Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), das die Arbeiten im Projekt DC-INDUSTRIE gefördert hat, dem Zentralverband der Elektroindustrie (ZVEI), der mit seiner Initiative und einer Vorstudie den Grundstein gelegt und die weiteren Arbeiten stets begleitet hat, sowie der Heinz und Heide Dürr Stiftung und der Karl Schlecht Stiftung für die Co-Finanzierung der Arbeiten des Instituts für Energieeffizienz in der Produktion der Universität Stuttgart in diesem Themenfeld.

Stuttgart, Juli 2020

Alexander Sauer

Leiter des Instituts für Energieeffizienz in der Produktion (EEP) und des Fraunhofer-Instituts für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA)

Der Klimawandel ist momentan eine der größten Herausforderungen der Menschheit. Um dem Klimawandel entgegenwirken zu können, gilt es die weltweiten CO₂-Emissionen drastisch zu reduzieren. Das kann nur durch die Dekarbonisierung der gegenwärtigen Energieerzeugungslandschaft gelingen. Ein großer Beitrag dazu wird der Ausbau und die Integration von erneuerbaren Energien in das bestehende Stromnetz leisten. Damit geht jedoch die große Herausforderung insbesondere für Industrieunternehmen einher, auf fluktuierende Energieangebote und einer damit verbundenen niedrigeren Energiebereitstellungsqualität optimal reagieren zu können, ohne davon den zugrundeliegenden Produktionsprozess in minimalster Weise negativ beeinflussen zu lassen.

Neben der Dekarbonisierung der Energieerzeugung spielt auch die Erhöhung der Effizienz innerhalb der zahlreichen Energiewandlungsketten eine entscheidende Rolle auf dem Weg zu einer nachhaltigeren und umweltschonenderen Industrielandschaft. Insbesondere in Anbetracht dessen, dass z. B. in Deutschland circa 45 % des elektrischen Energieverbrauchs allein auf die Industrie entfallen.

Der oben genannten Herausforderungen hat sich das vom BMWi geförderte Forschungskonsortium DC-INDUSTRIE mit der Entwicklung des weltweit ersten offenen industriellen Gleichstromnetzes (DC-Netz) für die Fabrikautomation drei Jahre lang intensiv gewidmet, mit dem vorrangigen Ziel eine bedarfsorientierte Verteilung von Energie innerhalb von Produktionsanlagen mit einem Höchstmaß an Energiewiederverwendung und einer Minimierung von Wandlungsverlusten zu gewährleisten. Aus diesen Arbeiten ist das hier vorliegende Buch entstanden, mit dem Ziel den Leser auf unsere gemeinsame „Entwicklungsreise“ mitnehmen.

Im ersten Teil des Buches werden die Potenziale einer industriellen Gleichstromversorgung diskutiert und die sich daraus ergebenden Chancen für die Antriebstechnik.

Im zweiten Teil wird, beginnend mit einer Anforderungsanalyse, das entwickelte DC-INDUSTRIE-Systemkonzept vorgestellt, welches bei Einhaltung der dort vereinbarten Spezifikation, einen herstellübergreifenden Betrieb unterschiedlicher Geräte und die einfache Integration von erneuerbaren Energiequellen und geeigneten Speichersystemen (Batterien, Kondensatorbänke, Massenschwungspeicher) an einem gemeinsamen DC-Netz ermöglicht. Zudem wird ein herstellerübergreifendes, dezentrales Netzmanagementkonzept für hochdynamische industrielle Gleichstrom-Mikronetze vorgestellt.

Im dritten und letzten Teil des Buches wird auf verschiedene Aspekte der Sicherheits- und Schutztechnik eingegangen, insbesondere hinsichtlich der Anforderungen an und Auslegung von eigens dafür entwickelter DC-Schutzschalter. Zudem wird der Leser durch einen Planungs- und Auslegungsprozess geführt, der speziell für das hier vorgestellte neuartige offene DC-Netz entwickelte wurde. Abschlie-

ßend wird die, in vier unterschiedlichen Demonstrationsanlagen, erfolgreich stattgefundene Umsetzung und Validierung des DC-INDUSTRIE-Konzeptes vorgestellt.

Dieses Vorwort wäre sehr unvollständig, wenn ich nicht auch einige Worte zum großen Engagement des DC-INDUSTRIE-Konsortiums verlieren würde, welches dieses Werk erst möglich gemacht hat.

Voraussetzung für die außerordentlich starke Innovationskraft des Projektes war, neben der geballten fachlichen und interdisziplinären Kompetenz des Konsortiums, ein durch Vertrauen, Respekt, Transparenz, Offenheit, Engagement und einer offenen Feedback-Kultur geprägter Team-Spirit.

Dabei möchte ich betonen, dass es widersprüchlich und mehr als fahrlässig gewesen wäre, zu glauben, gemeinsam ein offenes Systemkonzept entwerfen zu können, ohne eine Offenheit im Denken und im Handeln bei jedem Einzelnen voraussetzen zu können.

Auf der fachlichen Seite war es wichtiger denn je, im täglichen Handeln, die Kompetenzen aller notwendigen Disziplinen zu bündeln und immer das Gesamtsystem in den Blick zu nehmen, um keine isolierte bzw. „sterile“ Forschung an Einzeltechnologien zu betreiben.

Zum Schluss möchte ich diese Gelegenheit nutzen, um mich im Namen aller DC-INDUSTRIE-Teammitglieder und Partnerunternehmen beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die Förderung des DC-INDUSTRIE-Projektes und das damit uns entgegengebrachte Vertrauen sehr herzlich zu bedanken.

Ein sehr großer Dank geht auch an alle DC-INDUSTRIE-Lenkungskreismitglieder, vertreten durch ihren Sprecher, Herrn Prof. Dr. Alexander Sauer, für die wertvollen Ratschläge und die stetige Unterstützung über die gesamte Projektlaufzeit.

Mein Dank wäre sehr unvollständig, wenn ich in ihn nicht den wissenschaftlichen Leiter (und einer der Initiatoren) des Konsortiums einschließen würde: Ich danke Herrn Prof. Dr. Holger Borchering für seinen außerordentlichen Weitblick und seine fortlaufende Unterstützung, die das Projekt sehr geprägt haben.

Erlangen, Mai 2020

André Leonide

Konsortialprojektleiter DC-INDUSTRIE

1

Gleichstrom kehrt zurück

Alexander Sauer
Karl-Peter Simon
Sebastian Weckmann

Ende des 19. Jahrhunderts begann das Elektrizitätszeitalter. Herausragende Ingenieure, Erfinder und Unternehmer waren damals bestrebt, ein Stromversorgungssystem zu entwickeln, das sowohl die Stromerzeugung als auch die Stromübertragung und -verteilung gewährleistet. Mit Beginn des Elektrizitätszeitalters entbrannte jedoch auch ein Kampf zwischen der Gleichstrom- und der Wechselstromtechnologie um die Vorherrschaft. Er ging als „Stromkrieg“ in die Geschichte ein.

Mit der Entdeckung des dynamoelektrischen Prinzips 1866 durch Werner von Siemens wurden erstmals größere Mengen von elektrischer Energie verfügbar [Siem1891], die mit der Erfindung des Transformators 1881 durch Lucien Gaulard und John Dixon Gibbs auch über weite Strecken ohne große Verluste transportiert werden konnten [Walt2005]. Durch Transformation auf eine höhere Spannung konnte elektrische Leistung von nun an mit kleinerem Strom und damit geringeren Leitungsverlusten übertragen werden. In Kombination mit der Erfindung des Zweiphasenwechselstroms im Jahre 1887 durch Nikola Tesla und des Dreiphasenwechselstroms im Jahr 1888 durch Dolivo Dobrowolski waren diese Technologien schließlich so erfolgreich, dass sie auch heute noch die Grundlage unseres Elektrizitätssystems bilden [Grab1921].

Dabei waren in der Anfangszeit kleinere Inselnetze zur Versorgung elektrischer Beleuchtung sowie kleinerer Gleichstrom-Motoren im Bereich von 110 Volt in Betrieb. Edison, der Erfinder der Gleichstromtechnologie, kannte den Nachteil der geringeren Übertragungsweite seiner 110 Volt-Gleichspannungsnetze gegenüber hochtransformierter Wechselspannung und wollte ihn durch eine Vielzahl von lokalen kleineren Kraftwerken kompensieren [Cowl2006].

Edisons Patent für Glühlampen von 1880 gab der Elektrizitätsentwicklung den entscheidenden Schub. Er erkannte, dass er seine Lampen nur verkaufen konnte,

wenn der Öffentlichkeit ein Stromnetz zur Verfügung steht. Also kaufte er ein altes Gebäude in der Pearl Street in New York City und verwandelte es in ein Kraftwerk. Im September 1882 wurden mit 800 Lampen das Hauptquartier der New York Times und andere Einrichtungen beleuchtet. Nach diesem bemerkenswerten Erfolg gründete Edison die General Electric Company. Fasziniert vom aufstrebenden Elektroenergiegeschäft erkannte der Wirtschaftsmagnat George Westinghouse die Schwachstellen im Gleichstromsystem von Edison hinsichtlich der Übertragungseffizienz und kaufte Patentrechte am Transformator sowie an Teslas AC-Motor. Bis 1889 hatte Westinghouse 870 Wechselstromnetze aufgebaut und begann Edisons Gewinn einzuschränken. Darüber hinaus war Edison bezüglich der gesellschaftlichen Akzeptanz der Elektrizitätsnutzung besorgt. Er befürchtete, dass durch etwaige Unfälle bei hohen Spannungen in Wechselstromnetzen sein Geschäftsmodell gefährdet sein könnte. Insbesondere war die Sicherheit von Elektrizität – verglichen mit der von Gas ausgehenden Brandgefahr – eines seiner zentralen Argumente [Isra2000]. Um den Wechselstrom zu diskreditieren, schlug Edison ihn für die Vollstreckung der Todesstrafe vor. Zur Demonstration der Wirksamkeit reiste Edisons Mitarbeiter Harold Brown von Stadt zu Stadt und tötete öffentlich Hunde, Kühe, Pferde und sogar Topsy, einen drei Tonnen schweren Elefanten [Coward2006].

Letztendlich waren es zwei geschichtliche Meilensteine, die für den Durchbruch der Wechselstromtechnologie sorgten. Im Rahmen der Chicago World Fair 1893, der ersten vollelektrischen Weltausstellung, erlebten 27 Millionen Besucher die Beleuchtung mit 100 000 Glühlampen. Die spektakulärste Beleuchtung, die die Welt je gesehen hatte. Im Jahre 1890 finanzierte die Internationale Niagara-Kommission unter Leitung von Lord Kelvin einen Wettbewerb, um die Energie der Niagarafälle zu nutzen. Ursprünglich wollte Kelvin ein Gleichstromnetz, änderte seine Meinung jedoch nach dem Besuch der Chicago Fair. So fiel die Entscheidung für die Wechselstromtechnologie. Sie setzte sich damals durch, da sie zu dem Zeitpunkt rund die Hälfte günstiger war als die Gleichstromtechnologie. Der Grund dafür war insbesondere die direkte Übertragung des von Generatoren erzeugten dreiphasigen Wechselstroms in Verbindung mit passiven Transformatoren zur Skalierung der Spannungshöhe [Coward2006].

Seit der Chicago World's Fair hat sich die Welt, in der wir leben und das damit verbundene Energiesystem grundlegend geändert. Im Jahr 1947 entwickelten die Wissenschaftler Bardeen, Brattain und Shockley ein neues elektronisches Bauelement, das den Stromfluss mittels eines elektrischen Signals steuern konnte – den Transistor. Parallel zum eigentlichen Transistor entwickelten sich spezielle Halbleiterbauteile: Allen voran die Diode, aber auch Thyristor und Triac, die geeignet sind, Ströme von mehreren Tausend Ampere zu schalten [Klos1987]. Der Transistor brachte neue Möglichkeiten zur Herstellung von integrierten Schaltkreisen. Insbesondere das Militär und die damit verbundene Raumfahrt stellten immer höhere Anforderungen an elektronische Bauteile hinsichtlich Zuverlässigkeit,

Leistungsfähigkeit, Volumen und Gewicht. Sie konnten nur durch integrierte Schaltungen erfüllt werden. Im Zuge der Entwicklung von Mikroprozessoren hielt die Halbleitertechnik flächendeckend Einzug in das öffentliche Leben. Heute gibt es kaum noch ein technisches Gerät ohne Halbleiter-Elektronik [Fair2012a]. Alle diese elektronischen Schaltungen benötigen Gleichspannung. So hat die Gleichstromtechnologie (DC) das Potenzial die Wechselstromtechnologie (AC) über kurz oder lang abzulösen, weil sie effizienter und billiger ist.

Die Zahl der Gleichstromverbraucher steigt in unserem täglichen Leben immer weiter an. So machen z.B. LEDs (light emitting diodes) einen großen Trend der Beleuchtungsindustrie aus. LED-Leuchten haben eine hohe Energieeffizienz und im Vergleich zu Energiesparlampen eine um den Faktor zehn höhere Lebensdauer. Bei einer Betriebsdauer von acht Stunden pro Tag halten LEDs im Mittel 20 Jahre, und erst danach ist man gezwungen, die Lichtquelle durch eine neue zu ersetzen. LEDs arbeiten mit Gleichstrom. Wird, ähnlich wie in Rechenzentren, nicht jede Lampe mit einem Wechselrichter (als AC/DC-Wandler) ausgestattet, sondern ein lokales Gleichstromnetz mit zentralem Wechselrichter aufgebaut, können der gesamte Wirkungsgrad (Minimierung der Verlustleistung) und die Ressourceneffizienz verbessert werden, denn die heutigen AC/DC-Wandler haben eine Lebenserwartung, die deutlich unter der der LEDs liegt. Zusätzlich werden fortschrittliche Beleuchtungssteuerungen entwickelt, die vollständig und ohne Mehrkosten in das DC-System integriert sind [Gago2018].

Mobile und internetfähige Geräte wie Smartphones und Tablets verändern die Art und Weise, wie wir heute miteinander kommunizieren. Eine grundlegende Voraussetzung ist, dass die Benutzer ihre Geräte über ein Ladekabel an eine Gleichstromquelle anschließen können, um den integrierten elektrischen Energiespeicher mit Gleichstrom zu laden. Dabei werden im Stand der Technik lokale Ladegeräte verwendet, welche jeweils von einer Steckdose (230 Volt AC) auf die benötigte DC-Spannung (5 Volt DC) umwandeln und dabei Stromwärmeverluste erzeugen. Das Gleiche gilt für integrierte Netzteile in PCs, Monitoren und Fernsehern.

Für die Gebäudeautomatisierung kommen zusätzliche Verbraucher wie Heizungspumpen, Klimageräte und Lüfter hinzu, die je nach Leistung ebenfalls eine DC-Kleinspannung oder einen einphasigen Frequenzumrichter mit DC-Zwischenkreis (ca. 325 V) nutzen.

Rechenzentren, die für das Internet und unsere Telekommunikationsnetze notwendig sind, verbrauchen heute weltweit mehr als 1,3% des Stroms, Tendenz steigend. Anstatt AC/DC-Wandler in jedem Computer zu installieren, nutzen einige Unternehmen große zentralisierte Wechselrichter und verteilen 380 Volt Gleichspannung in ihren Serverfarmen. Energieeinsparungen werden vor allem dadurch erzielt, dass die in einzelnen Servern integrierten AC/DC-Wandler durch effizientere Zentralgleichrichter ersetzt werden. Die Umstellung auf diese zentralen

Gleichrichter und die effizientere Anbindung von Batterie-Backup-Systemen senken den Stromverbrauch um 15% im Vergleich zu herkömmlichen AC-Konfigurationen [Fair2012b].

Die Verbreitung der Elektromobilität macht die Gleichstromtechnik noch wichtiger. Dabei werden viele Fahrzeuge mit Wechselstrom geladen, der zu Hause, an Einkaufsplätzen oder am Arbeitsplatz zur Verfügung steht. Dabei wird im Fahrzeug selber die Umwandlung von Wechsel- zu Gleichstrom vorgenommen. Der Bauraum für die entsprechenden Wandler ist jedoch aus Kosten-, Platz- und Gewichtsgründen begrenzt. Das bedeutet, dass es – je nach Fahrzeug – zwischen vier bis über zwölf Stunden dauern kann, bis die Batterie vollständig aufgeladen ist. Gleichstrom-Schnellladesysteme umgehen die Einschränkungen von fahrzeug-internen Wandlern. Mit ihnen kann die Ladegeschwindigkeit stark erhöht werden. Die Gleichstrom-Schnellladung ist unerlässlich für Fahrten mit hoher Kilometerleistung sowie für große Flotten. Der schnelle Turnaround ermöglicht es dem Fahrer, während des Tages oder in einer kleinen Pause aufzuladen [Schr2012].

Auch auf der Erzeugungsseite sehen wir massive Veränderungen im Stromsystem: Der Ausbau regenerativer Energien ist weltweit eines der großen Entwicklungsthemen, das auch in Deutschland über die Energiewende vorangetrieben wird. Die EU hat bereits 2007 beschlossen, dass der Anteil erneuerbarer Energien am Brutto-Endenergieverbrauch (Strom, Wärme, Kraftstoffe) der EU-Staaten bis 2020 auf 20% steigen soll. Darüber hinaus legte 2018 die EU ihre langfristige strategische Vision für eine wohlhabende, moderne, wettbewerbsfähige und klimaneutrale Wirtschaft bis 2050 vor. Für Deutschland ist ein Anteil erneuerbarer Energien von 18% am Primärenergiebedarf bis 2020 angestrebt. Bis 2030 sollen 30%, bis 2040 45% und bis 2050 60% erreicht werden [Ren2019]. Insgesamt stellen die erneuerbaren Energien mittlerweile mehr als 40% der installierten Leistung [UBA2020]. Dabei produzieren Solarkraftwerke ohnehin Gleichspannung, die dann über DC/AC-Wandler in Wechsel-/Drehstrom umgewandelt wird. Auch der von Windkraftwerken produzierte Drehstrom (Drehfrequenz proportional zur Drehzahl der Flügel) wird zunächst in einem Gleichspannungszwischenkreis gepuffert und daraus wieder als Drehstrom (Drehfrequenz proportional zum dreiphasigen Netz) entnommen. Diese Zwischenwandlung ist notwendig, um synchronisiert zum bestehenden AC-Netz mit 50/60 Hertz einspeisen zu können.

Die Energiespeicherung ist einer der Hauptfaktoren für das Erreichen energieflexibler Systeme bei fluktuierender Erzeugung und vorhandenen Netzengpässen. Die Fähigkeit, lokal erzeugte Energie zu speichern und später zu nutzen, hat eine große Bedeutung, da sie eine Lösung für die Probleme instabiler oder teurer Stromnetze darstellt und ein entscheidendes Instrument für die Steigerung der Nutzung und Integration erneuerbarer Energien ist. Es gibt eine Vielzahl von Technologien zur Speicherung von Strom, wie z. B. Akkumulatoren, Gas, Druckluft und Chemikalien sowie Pumpspeicherkraftwerke. Das wachsende Bedürfnis nach Flexibilität

und Autonomie, bei dem die Verbraucher auch zu Energieerzeugern werden, treibt immer weitere Innovationen in der Energiespeicherung voran, sodass eine breite Palette neuer Lösungen entsteht. Die wichtigsten Speichertechnologien für gewerbliche und industrielle Anlagen sind Akkumulatoren zur Speicherung elektrischer Energie oder thermische Energiespeichersysteme zur Speicherung von Kaltwasser, Eis oder Wärme. Diese können als eigenständige Systeme betrieben werden oder mit Solar-Systemen zusammenarbeiten. Die elektrischen Speicher werden, wegen der zugrundeliegenden physikalischen Wirkprinzipien, fast ausschließlich mit Gleichstrom betrieben [Chio2018].

Auch die Stromübertragungstechnologien haben sich weiterentwickelt. So bietet die Hochspannungs-Gleichstromübertragungstechnologie mehrere Vorteile gegenüber Wechselstromübertragungssystemen und ermöglicht eine effizientere Übertragung der Massenleistung über lange Strecken. Wenn die Übertragungsleitung länger als etwa 480 km ist, ist Gleichstrom eine bessere Option, da Wechselstromleitungen mehr Leitungsverluste aufweisen [Rai2016].

Auch in der industriellen Produktion wird Gleichstrom verwendet: In Produktionsanlagen wie Spritzguss-, Werkzeug- und Verpackungsmaschinen oder in Industrierobotern werden Motoren durch Servo- oder Frequenzumrichter bedarfsgerecht als elektronisch drehzahlveränderbare Antriebe bewegt. Innerhalb dieser Umrichter wird die Wechselspannung des Versorgungsnetzes typischerweise durch Gleichrichter zunächst in eine Zwischenkreis-Gleichspannung umgewandelt, um daraus mit Hilfe eines selbstgeführten Wechselrichters eine für den Motor in Amplitude und Frequenz veränderbare Wechselspannung bereitzustellen.

Die einfachste und verbreitetste Form der Gleichrichtung erfolgt durch ungesteuerte Diodengleichrichter. Diese erzeugen hohe pulsformige Nachladeströme an den Spannungsmaxima.

Durch den zunehmenden Einsatz von Umrichtern, welche durch die Eingangsgleichrichter das Netz mit sehr hohen nichtsinusförmigen Strömen belasten, sinkt die Netzqualität. Immer häufiger verschlechtert sich dadurch die Spannungsqualität auf ein Niveau, das erhebliche Filtermaßnahmen am Einspeisepunkt einer Fabrik erfordert, um das externe AC-Netz nicht unzulässig zu stören. Diese Netzwirkungen werden verursacht durch den Betrieb einer Vielzahl elektrischer Verbraucher (wie z.B. Netzteile oder Umrichter), die mit hoher Schaltfrequenz arbeiten und damit die Stabilität des Stromnetzes beeinflussen. Solche Rückwirkungen können beispielsweise Spannungseinbrüche (verursacht durch transiente Schaltvorgänge) oder Spannungsverzerrungen (verursacht durch nichtlineare Verbraucher) sein. Die Anlagen zur Spannungsfilterung und zur Blindleistungskompensation benötigen i. d. R. teure passive Bauteile und sind damit nicht nur platzintensiv und teuer, sondern erfordern auch den Einsatz wertvoller Ressourcen. Siehe hierzu auch die Ausführungen in Kapitel 4 „Chancen für die Antriebs-technik“.

Gleichzeitig entstehen bei jeder Umwandlung von Wechsel- in Gleichstrom und umgekehrt erhebliche Wandlungsverluste; das gilt wie bereits ausgeführt auch für LED-Leuchten, Ladegeräte von Smart Devices oder Rechenzentren. Damit begünstigt der zunehmende Einsatz von drehzahlveränderbaren Antrieben die Überlegungen zu einer alternativen Netzstruktur, bei der DC-Spannung innerhalb einer Fabrik als Verteilnetz überall zur Verfügung steht.

Im Jahr 2016 betrug der Endenergieverbrauch in der Industrie sowie in den Bereichen Gewerbe, Handel und Dienstleistungen 1128 TWh. Das entspricht rund 45 % des gesamten deutschen Endenergieverbrauchs. Seit 2008 steigerte sich die Endenergieproduktivität (Energieeffizienz) der deutschen Wirtschaft um mehr als 10 %, gleichzeitig blieb allerdings der absolute Endenergieverbrauch mit einer Veränderung von -0,1 % nahezu konstant. Daher sind weitere erhebliche Anstrengungen für das Erreichen der nationalen und internationalen Klimaschutzziele unerlässlich. Ohne eine drastische Verbesserung der Energieeffizienz ist keine wirtschaftliche Energiewende möglich. Dies bedeutet jedoch unter anderem den stark zunehmenden Einsatz drehzahlvariabler Antriebssysteme. Die Gesetzgebung der EU (19 Verordnung (EU) 2019/1781 der Kommission vom 1. Oktober 2019 zur Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an Elektromotoren und Variable Speed Drives) fördert diesen Systemansatz noch nicht, da weiterhin lediglich einzelne Komponenten gesetzlich geregelt werden und damit eine Optimierung der gesamten Applikation hinsichtlich Energieeffizienz und Wirtschaftlichkeit nicht im Fokus steht. Ein drastisches Umdenken bzgl. des Systemansatzes in Verbindung mit einer Veränderung der Netzstruktur ist erforderlich, wenn die Effizienzziele erreicht werden sollen.

Die Gleichstromtechnologie ist heute präsenter als jemals zuvor. Allein für Europa wird ein Marktwachstum von 1000 % im Zeitraum von 2017 bis 2025 vorausgesagt [Fros2020]. Vor dem Hintergrund eines zunehmenden Kostendrucks und der gesellschaftlichen Forderung nach immer größeren Einsparungen hinsichtlich Ressourcen und CO₂ Emissionen ist insbesondere auch die Industrie gezwungen, ihre Energieproduktivität deutlich zu steigern [Gerb2018].

Die Rahmenbedingungen haben sich verändert: Gleichstrom wird dezentral direkt aus Sonnen- und Windenergie erzeugt. Auch über weite Strecken kann Gleichstrom heute effizient übertragen werden. In einem industriellen DC-Netz entfallen die negativen Rückwirkungen auf die Netzqualität, werden die Wandlungsverluste reduziert und die Rückgewinnung von generatorischer Bewegungsenergie (Rekuperation) wird ein integraler Bestandteil.

Die Gleichstromtechnologie ist der wesentliche Schlüssel für ein neues Energiezeitalter. Bislang wird in industriellem Maßstab Gleichstrom zur Versorgung von Produktionslinien nur in proprietären Bereichen angewendet. Diese in sich abgeschlossen Teilnetze können jedoch nicht das Potenzial einer ganzen Fabrik

erschließen. Die nachfolgenden Kapitel zeigen, wie ein offenes Gleichstromnetz gestaltet werden kann, welche Technologien hierfür notwendig sind, wie sie eingesetzt werden können und wo die spezifischen Herausforderungen liegen.

Literatur

- [Siem1891] Siemens, Werner: Die dynamo-elektrische Maschine. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1891
- [Walt2005] Walter, H.-J.: Die Erfinder des Transformators. In: Elektrische Maschinen, Huthig Verlag, S.28., 2005
- [Grab1921] Grabscheid, Johann: Elektromotoren. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1921
- [Cowd2006] Cowdrey, John: The war of the currents. Home Power Magazine 111. Oregon, 2006, http://h2oradio.org/PDF/WaroftheCurrents_Cowdrey.pdf (Online am 23.04.2020)
- [Isra2000] Israel, Paul: Edison: A Life of Invention. John Wiley & Sons-Verlag, New York, 2000
- [Klos1987] Kloss, Albert: Von der Electricität zur Elektrizität. Birkhäuser-Verlag, Basel, 1987
- [Fair2012a] Fairley, Peter: DC Versus AC: The Second War of Currents Has Already Begun [In My View]. IEEE Power and Energy Magazine. Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, 2012
- [Gago2018] Gago-Calderón, Alfons; Orejón-Sánchez Rami D.; Hermoso-Orzáez, Manolo J.: DC Network Indoor and Outdoor LED Lighting. IntechOpen-Verlag, London, 2018
- [Fair2012b] Fairley, Peter: Edison's Revenge: The Rise of DC Power. Technology Review Magazine. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2012
- [Schr2012] Schroeder, Andreas; Traber, Thure: The economics of fast charging infrastructure for electric vehicles. Elsevier-Verlag, Berlin, 2012
- [Ren2019] N.N.: Renewables 2019 Global Status Report. REN21, Paris, 2019, https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf (Online am 23.04.2020)
- [UBA2020] N.N.: Erneuerbare Energien in Zahlen. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/erneuerbare-energien-in-zahlen#uberblick> (Online am 01.04.2020),
- [Chio2018] Chiodo, Elio; Fantauzzi, Maurizio; Lauria, Davide; Mottola, Fabio: A Probabilistic Approach for the Optimal Sizing of Storage Devices to Increase the Penetration of Plug-in Electric Vehicles in Direct Current Networks. Energies. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, Basel, 2018
- [Rai2016] Rai, Anil Kumar; Sharma, Chandra Shekhar: DC Vs AC War Of Currents For Future Power Systems A HVDC Technology Overview. International Journal of Scientific & Technology Research, Delhi, 2016, <https://www.ijstr.org/final-print/may2016/Dc-Vs-Ac-War-Of-Currents-For-Future-Power-Systems-A-Hvdc-Technology-Overview.pdf> (Online am 23.04.2020)
- [Fros2020] N.N.: European DC Power Distribution Market, Forecast to 2025: Collaboration amongst OEMs, Distributed Energy Providers, and Governments is Critical for Implementing the DC Infrastructure. Frost & Sullivan, New York, 2018, <https://store.frost.com/european-dc-power-distribution-market-forecast-to-2025.html> (Online am 01.04.2020)
- [Gerb2018] Gerbert, Philipp; Herhold, Patrick; Burchardt, Jens; Schönberg, Stefan; Rechenmacher, Florian; Kirchner, Almut; Kemmler, Andreas; Wunsch, Marco: Klimapfade für Deutschland. Boston Consulting Group, München, 2018, <https://bdi.eu/publikation/news/klimapfade-fuer-deutschland/> (Online am 27.04.2020)

2

Potenziale einer industriellen Gleichstromversorgung

Timm Kuhlmann
Patrick Spanier
Martin Ehlich

■ 2.1 Wandel vom AC-Netz zum DC-Netz

AC-Netze sind weltweit in allen Fabriken Stand der Technik. Dabei gibt es regional große Unterschiede, was Spannungshöhe, Frequenz und Erdungssysteme angeht. Deshalb werden heute AC-Geräte in der Regel für variable Eingangsspannungen und unterschiedliche Anschlussbedingungen entwickelt und qualifiziert.

Verbraucher in einem AC-Netz

Im Industriebereich sind dreiphasig gespeiste elektrische Antriebe mit DC-Zwischenkreis (400 V...800 V) die „treibende“ Kraft in allen Maschinen und Anlagen. Sie verwenden über 70% der elektrischen Energie in einer Fabrik und setzen diese in mechanische Bewegung um.

Eine heutige Fabrik mit typischen Verbundnetz-Teilnehmern ist in Bild 2.1 skizziert.

Die fabrikinterne AC-Verteilung wird in der Regel über einen eigenen zentralen Transformator am Netzanschlusspunkt gespeist. Wenn die Leistung nicht ausreicht oder aus Sicherheitsgründen Redundanz gefordert ist, können es auch mehrere solcher Einspeisepunkte sein. Die AC-Verteilung arbeitet 3-phasig. Einzelne Bereiche, Maschinen oder größere Einzelverbraucher können separat über Schütze zu- und abgeschaltet werden. Im Fehlerfall trennt ein Schutzschalter oder eine Sicherung diese energienutzenden Zonen vom AC-Netz. Diese Schalt- und Schutzelemente sind als Vereinfachung in Bild 2.1 nicht dargestellt. Der Fokus liegt auf den typischen Verbrauchern innerhalb dieser Zonen:

- direkt am AC-Netz angeschlossene Drehstrommotoren, z.B. in Pumpen, Lüftern, Klimageräten sowie zur Druckluft- und Hydraulikerzeugung
- komplette Bearbeitungsmaschinen und Roboter mit vielen individuell steuerbaren Achsen
- Positions-, Drehzahl- oder Drehmomentgesteuerte Einzelantriebe, die in allen Produktionslinien sowie in Förder- und Hubanwendungen zum Einsatz kommen
- Schweißkoffer für das Widerstandsschweißen in der Automobilindustrie; diese nutzen ebenfalls Umrichter mit DC-Zwischenkreis, um die Primärseite des Mittelfrequenz-Schweißtransformators anzusteuern
- passive Verbraucher, wie z.B. Heizungen für Wärmeöfen, Lötanlagen in der Elektronikfertigung oder Heizanwendungen für die Kunststoff- oder Klebverarbeitung
- alle Arten von Automatisierungsgeräten, wie Maschinen- und Anlagensteuerungen, Kommunikationssysteme, Näherungsschalter, Lichtschranken etc. benötigen eine Gleichspannung von 24 V zur Versorgung der integrierten Elektronik; diese Hilfsspannungsversorgung wird über eine Vielzahl von separaten oder geräteintegrierten AC-Netzteilen bereitgestellt
- Steckdosen für ortsveränderliche Geräte, elektrische Werkzeuge für lokale Wartungs- oder Montagearbeiten oder Messgeräte; auch in den Schaltschränken werden oft 230 V Steckdosen vorgesehen

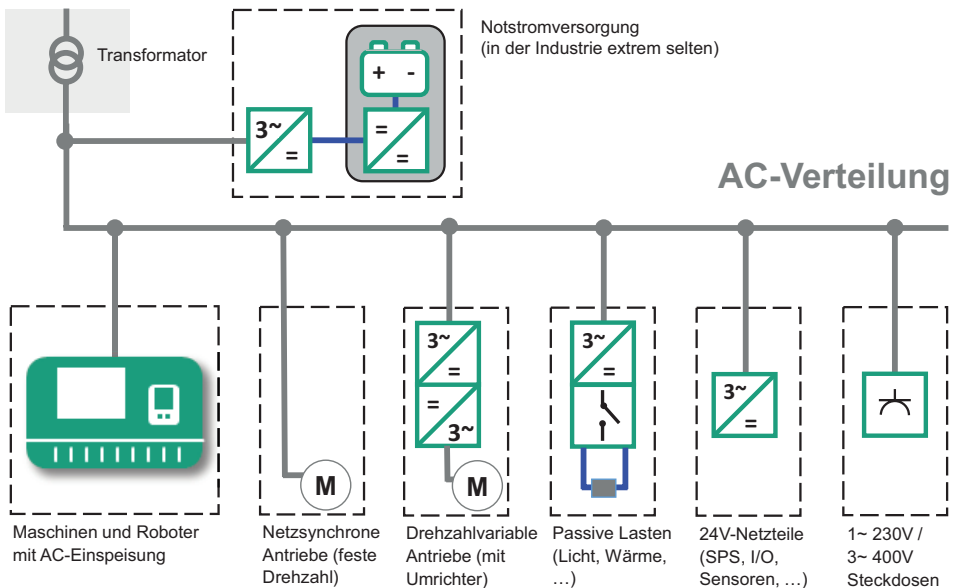


Bild 2.1 Topologie in einem industriellen AC-Fabriknetz

Rückspeisung in einem AC-Netz

Vom Prinzip her ist die Stromrichtung in der AC-Verteilung bidirektional, was auch in einigen Anwendungen genutzt wird. Allerdings können nur solche Verbraucher Energie zurückspeisen, bei denen im Prozess generatorische Energie anfällt. Diese Energie muss entsprechend gewandelt werden, damit sie synchron zur Frequenz des AC-Netzes abgegeben werden kann. Dies ist nur mit aktiv geregelten Eingangswchselrichtern möglich, welche ungleich aufwändiger und teurer sind als die meist eingesetzten unidirektionalen Diodengleichrichter. Eine Rückspeisung von Energie in ein AC-Netz wird daher nur dann eingesetzt, wenn eine deutliche Reduzierung der Energiekosten die Investition deckt.

Netzausfälle in einem AC-Netz

Bei einem Netzausfall wird der gesamte Produktionsprozess unmittelbar gestoppt. Dies ist sogar oft schon bei recht kurzen Unterbrechungen von weniger als einer Sekunde der Fall. Technisch gesehen gibt es die Möglichkeit, eine bestimmte Netzausfallzeit mit Hilfe von Batteriespeichern zu überbrücken. Die Kosten für Anschaffung, Installation, Wartung und Bauraum sind aber so hoch, dass solche Systeme in der Regel nur in sicherheitsrelevanten Bereichen wie Atomkraftwerken, Rechenzentren und Krankenhäusern zum Einsatz kommen.

Gründe für den Umstieg auf ein DC-Netz

Eine Analyse der industriellen Verbraucher zeigt, dass es in allen Anwendungsbereichen eine zunehmende Anzahl an Verbundteilnehmern gibt, welche die eingangsseitige AC-Spannung intern ohnehin in eine Gleichspannung umwandeln. Die Batteriespeicher zur Überbrückung von AC-Netzausfällen können nur mit Gleichspannung versorgt werden. Da ist der Gedanke naheliegend, diese Verbraucher direkt mit Gleichspannung zu versorgen.

Gleichzeitig gibt es immer mehr Energieerzeuger, welche einen Gleichstrom erzeugen, der über DC/DC-Wandler direkt in ein Gleichspannungsnetz eingespeist werden kann (Bild 2.2). Dazu gehören die am weitesten verbreiteten – da praktisch überall dezentral einsetzbar – regenerativen Technologien: Windenergie- und Photovoltaik-Anlagen (PV-Anlagen).

Bei Windrädern wird das rotatorisch erzeugte Drehspannungssystem zunächst mit Hilfe von elektronischen AC/DC-Wandlern in eine Gleichspannung umgewandelt, da die Generatoren zunächst eine Netz-asynchrone Wechselspannung erzeugen. Der heute erforderliche Wechselrichter (DC/AC-Wandler) kann für den Anschluss an ein DC-Netz durch einen vergleichsweise einfachen DC/DC-Wandler ersetzt werden. Damit kann lokal erzeugte Windenergie direkt in einem DC-Fabriknetz genutzt werden.

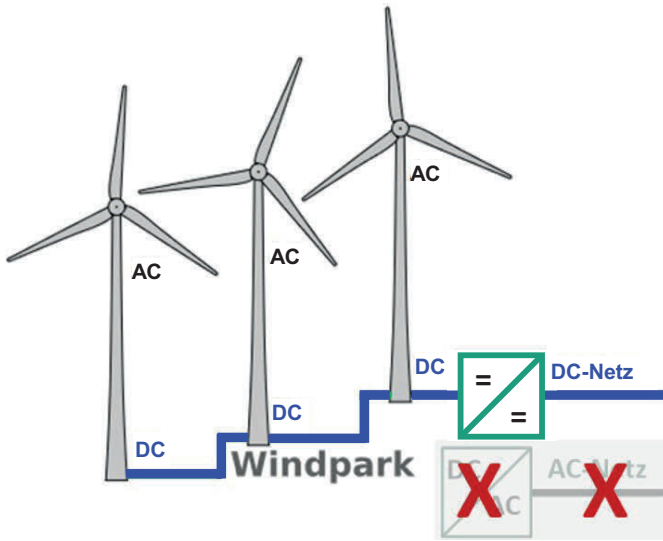


Bild 2.2 Windrad, direkt am Fertigungsstandort für grüne Energie

PV-Anlagen erzeugen prinzipbedingt eine Gleichspannung, deren Höhe von der Verschaltung der Solarmodule (Anzahl der seriell verbundenen Module in einem Strang) abhängt (Bild 2.3). Für die Nutzung in einem klassischen AC-Netz wird hier ebenfalls ein Wechselrichter benötigt, der den Strom netzsynchron und phasenrichtig einspeist. Der Anschluss einer PV-Anlage an ein DC-Netz ist einfacher umzusetzen.

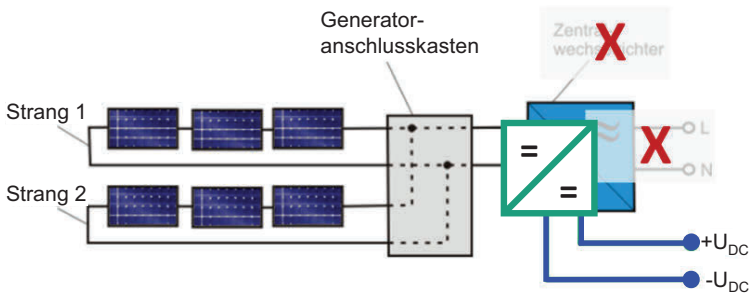


Bild 2.3 PV-Anlage für grüne Energie direkt vom Fabrikdach

Wegen der hohen Bedeutung und zahlenmäßigen Verbreitung drehzahlveränderlicher Antriebe mit DC-Zwischenkreis gibt es bereits seit langer Zeit Bestrebungen, einen Energieaustausch zumindest im lokalen Antriebsverbund herzustellen. Viele herstellereinspezifische Lösungen ermöglichen dies für begrenzte, proprietäre Verbundsysteme schon heute, bieten aber keinen offenen, herstellerübergreifen-