

HANSER



Leseprobe

zu

„Die Gleichstromfabrik“

von Alexander Sauer

Print-ISBN: 978-3-446-46581-7
E-Book-ISBN: 978-3-446-46612-8
E-Pub-ISBN: 978-3-446-46613-5

Weitere Informationen und Bestellungen unter
<http://www.hanser-fachbuch.de/978-3-446-46581-7>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

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

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

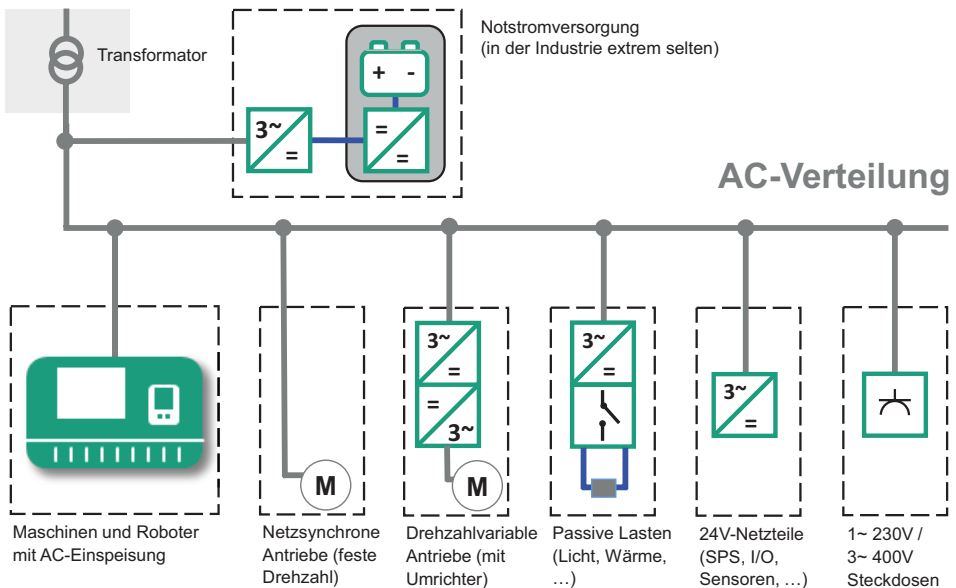


Bild 2.1 Topologie in einem industriellen AC-Fabriknetz

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.

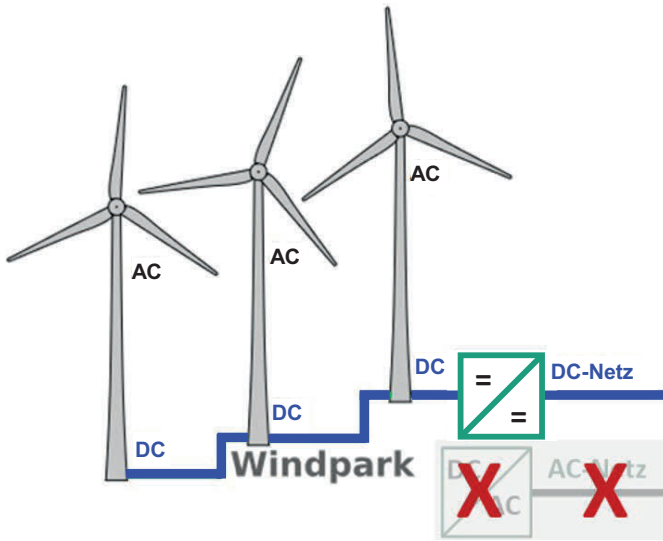


Bild 2.2 Windrad, direkt am Fertigungsstandort für grüne Energie

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.

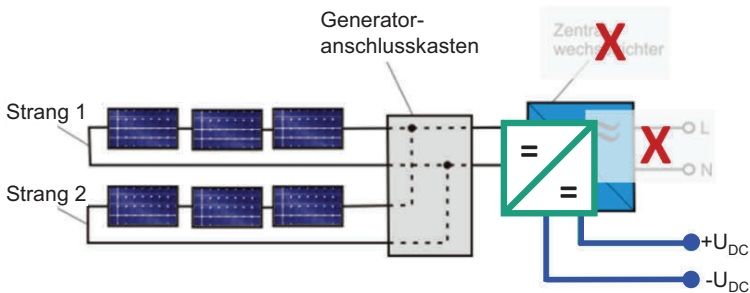


Bild 2.3 PV-Anlage für grüne Energie direkt vom Fabrikdach

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-

den Standard für komplette Anlagen und Fabriken. Diese sogenannten Zwischenkreisverbünde nutzen schon alle Vorteile eines DC-Netzes im kleinen Maßstab. Die Hersteller und Anwender solcher Antriebsachsen wissen genau, dass bei einem dynamischen Mehrachssystem viel rekuperierte Energie entsteht und weiterverwendet werden kann. Die Einsparung jeweils eines Gleichrichters und eines Bremswiderstands pro Achse reduziert die Gerätekosten und den Bauraum.

Andere nicht industrielle Bereiche nutzen DC-Verteilnetze dort, wo die Kompatibilität oder die Anbindung an ein AC-Netz nicht notwendig ist. Dazu gehören beispielsweise Bordnetze von E-Fahrzeugen, aber auch bei Schiffen wird bereits auf DC-Technologie gesetzt. Auch die Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge wird teilweise an einem DC-Verteilnetz betrieben, wenn es über einzelne Ladesäulen hinausgeht, und damit die vielfache Wandlung von AC nach DC entfällt. Bei größeren Rechenzentren (Server-Farmen) ist es schon Stand der Technik, alle Einheiten über ein DC-Verteilnetz zu versorgen.

Die Idee eines offenen DC-Netzes

Der umfassende Gedanke besteht darin, alle bisher genannten Systeme, soweit sie in der Industrie vorkommen, durchgängig über ein gemeinsames, offenes, d.h. herstellerübergreifendes DC-Netz zu versorgen. Dieses industrielle DC-Netz soll von einzelnen Maschinen bis auf komplette Fabrikhallen (Gebäude) skalierbar sein, weil hierbei alle Vorteile der DC-Technologie genutzt werden können, ohne dass Änderungen im äußeren Zuleitungsbereich oder auf der Mittelspannungsebene erforderlich sind.

Durch den systembedingten direkten Energieaustausch zwischen motorischen und generatorischen Prozessen entsteht im DC-Netz ein selbstregulierender Energieausgleich. Aus dem AC-Netzanschluss kann so ausschließlich die Energie bezogen werden, die abzüglich eventueller integrierter erneuerbarer Energiequellen für die Umsetzung von Fertigungsprozessen benötigt wird. Hauptsächlich wird diese Energie in Bearbeitungs-, Verarbeitungs- und Förderprozessen umgesetzt. Idealerweise soll keine überflüssige Energie aus Bewegungsabläufen mehr an Bremswiderständen verheizt werden.

Ein offenes DC-Netz mit typischen und möglichen Netzteilnehmern ist in Bild 2.4 skizziert.

In der Gleichstromfabrik müssen die gleichen Prozesse und Bewegungsabläufe wie vorher erfüllt werden. Im Unterschied zum AC-Fabriknetz gibt es ein oder mehrere zentrale Versorgungsgeräte als AC/DC-Wandler, welche die energetische Verbindung zum „speisenden“ AC-Netz herstellen. Je nach Geräteausführung ist dieser Energiefluss unidirektional (reine Einspeisung z.B. über Diodengleichrichter) oder bidirektional (Ein- und Rückspeisung mit Hilfe von Gleich- und Wechselrichtern).

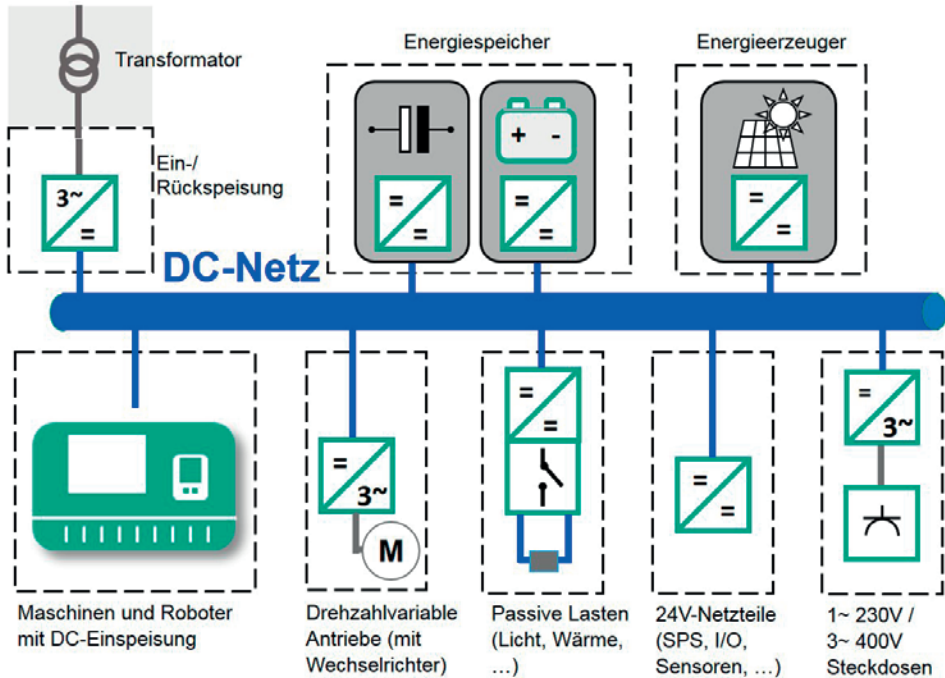


Bild 2.4 Topologie in einem industriellen DC-Fabriknetz

Weitere Merkmale des skizzierten DC-Fabriknetzes sind:

- Alle Antriebe in den Maschinen und Robotern sind jetzt direkt mit dem DC-Netz verbunden. Damit ist nicht nur ein Energieaustausch innerhalb eines Achsverbundes, sondern auch zwischen verschiedenen Anlagenteilen möglich.
- Netzsynchrone Antriebe werden durch drehzahlvariable Antriebe ersetzt. Dabei vereinfacht sich die Topologie innerhalb der Umrichter. Der Eingangsgleichrichter entfällt, der EMV-Filter wird durch den Entfall der Netzdrossel einfacher und die benötigte Zwischenkreiskapazität wird kleiner (siehe auch Kapitel 4.2 und Abbildung 4.5). Dies verringert Kosten, Energie- und Platzbedarf. Außerdem ist eine Integration der Elektronik in den Motor leichter möglich, was den Einsatz dezentraler Antriebe begünstigt. Diese wiederum bieten folgende Vorteile gegenüber Schaltschrankgeräten:
 - Kein Schaltschrank
 - Keine teuren, verlustbehafteten Motorleitungen
 - Verringerte Umladeverluste
 - Einfache Linienverdrahtung
 - Modulare Maschinen

- Passive Lasten werden über DC/DC-Wandler anstelle bisher notwendiger AC/DC-Wandler angesteuert.
- Die DC-Netzteile zur Bereitstellung der Hilfsspannungsversorgung sind einfacher, effizienter und kostengünstiger als vergleichbare AC-Netzteile, weil die interne Gleichrichtung entfällt und der Aufwand für Filterung reduziert wird, wie es auch bei den Frequenzumrichtern zu sehen ist (vgl. Kapitel 4.2 und Abbildung 4.5).
- Für den Anschluss von ortsveränderlichen 3-phasigen und 1-phasigen AC-Verbrauchern, die aktuell noch nicht mit DC-Anschluss verfügbar sind, können lokale Anschlüsse (Steckdosen als „AC-Inselnetze“) über DC/AC-Wandler bereitgestellt werden.
- Statische Energiespeicher in Form von Batterien oder Kondensatoren können sehr einfach mit dem DC-Netz gekoppelt werden. Kondensatorbänke können direkt an das DC-Netz gekoppelt werden, um beispielsweise lokale Spitzenlasten abzufangen und das DC-Netz zu stabilisieren. Batteriespeicher werden zwecks Spannungsanpassung und Leistungskontrolle über DC/DC-Wandler angeschlossen. Die Speicherkapazität und -technologie kann für die Überbrückung von kurzzeitigen AC-Netz-Störungen bis hin zu mittleren AC-Netz-Ausfallzeiten ausgelegt werden.
- Regenerative Energie von PV- oder Windkraftanlagen kann mit Hilfe von DC/DC-Wandlern in das DC-Netz eingespeist werden. Falls diese Energie gerade nicht innerhalb der Fabrik genutzt wird, kann sie z.B. über die Ein-/Rückspeisung ins AC-Netz gespeist, also verkauft werden.

Die Vorteile des DC-Netzes gegenüber einer vergleichbaren Anlage in AC-Technologie sind:

- geringerer Energiebedarf bei gleicher Produktionsleistung
- Optimal geeignet für die Integration grüner Energiequellen
- Rund-um-die-Uhr-Verfügbarkeit mit Hilfe moderner Energiespeicher möglich
- reduzierte Netzanschlussleistung mit entsprechend geringerem Strompreis und Ressourcenbedarf (Kupfer für Transformatoren und Leitungen), auch Spitzenlastreduzierung möglich
- ideale Schnittstelle zur Integration von Zukunftstechnologien (z.B. Schnell-Ladesäulen für E-Fahrzeuge, Formieren von Neufahrzeug-Batterien, Second-Life für elektrische Energiespeicher aus dem Feld)

Damit eignet sich das DC-Netz besonders gut für alle Aufgaben in der Fabrikautomation. Typische Anwendungen sind Produktionslinien, Bearbeitungszentren, Roboter, Fördereinrichtungen, Hubwerke und Prüfstände. Bei diesen Anlagen und Maschinen kommt eine hohe Anzahl an drehzahlveränderlichen Antrieben zum Einsatz, die beim Bremsen signifikante Anteile generatorischer Leistung erzeugen.

Das DC-Netz wird dort aus energetischer Sicht weniger geeignet sein, wo einzelne Grundlastantriebe im Dauerbetrieb laufen. Solche Anwendungen gibt es z.B. in der Prozessindustrie, bei der Wasserversorgung oder bei großen Förderanlagen. Das schließt natürlich nicht aus, dass aufgrund anderer Vorteile auch hier der Einsatz eines DC-Netzes sinnvoll sein kann.

■ 2.2 Teilautarke Energieversorgung durch Microgrids

Die ersten Versuche, Elektrizität in der Gesellschaft zu etablieren, sind daran gescheitert, dass sie aus teuren elektrochemischen Speichern zur Verfügung gestellt wurde. Erst die elektrische Kraftübertragung erlaubte die räumliche Trennung von Erzeugung und Verbrauch. Elektrizität entwickelte sich zu einem Energieübertragungsmedium, das bis heute nur in geringem Maß zwischengespeichert wird [Ditt2013].

Mit steigendem Anteil der durch Elektrizität versorgten Prozesse in Industrie und Alltag wandelten sich die anfänglichen Inselnetzstrukturen zu Verbundnetzen. Durch diese Vernetzung einer möglichst großen Anzahl an Verbrauchern und Erzeugern entstehen sowohl wirtschaftliche als auch technische Vorteile. Nach Strauß kann ein Verbundnetz die hohen Kosten vermeiden, die bei der Speicherung ausreichender Mengen an elektrischer Energie in entstehen [Stra2009]. Der Grund besteht darin, dass sich der schwankende Abruf von elektrischer Leistung mit steigender Anzahl an Abnehmern in der Summenlast stochastisch ausgleicht. Mit steigender Verbundnetzgröße steigt erwartungsgemäß die installierte Kraftwerkskapazität, allerdings sinkt im Verhältnis die Reservekapazität, welche für Lastschwankungen vorgehalten wird.

Betrachtet man die Entwicklung des Energiesystems unter dem Aspekt der Energiewende wird dieses Paradigma der Vernetzung und Größe von drei Aspekten infrage gestellt:

1. Die Erzeugungsleistung regenerativer Erzeugungsanlagen ist von meteorologischen Bedingungen abhängig, sodass konventionelle Kraftwerke, Verbraucher und Betreiber von Energiespeichern sich der aktuellen Erzeugungssituation anpassen müssen [PeekDiel2015], [Graß2015].
2. Im Vergleich zu konventionellen Erzeugungsanlagen werden regenerative Erzeugungsanlagen hauptsächlich im Verteilnetz angeschlossen [Sola2018]. Daher müssen neue Konzepte gefunden werden, das Netz auf Übertragungsebene steuerbar zu machen und die dezentralen Erzeugungskapazitäten in die Betriebsführung des Netzes einzubinden [Dena2014].

3. Vergleicht man regenerative und konventionelle Erzeugungsanlagen, ist ein wesentlicher Unterschied die geringere durchschnittliche Anlagenleistung regenerativer Energiequellen [BNA2018], [Lass2002]. Damit führt die Integration von erneuerbaren Erzeugern zu einem komplexeren Regelungssystem.

Bild 2.5 verdeutlicht die Auswirkungen dieser Entwicklung. Während der Energiefluss in der Vergangenheit hauptsächlich vom Übertragungsnetz in das Verteilnetz und schließlich zum Endverbraucher gerichtet war (a), führt die Integration regenerativer Erzeuger im heutigen Netzzustand zu ungesteuerten und bidirektionalen Ausgleichsströmen im Verteilnetz (b). Das in diesem Buch vorgestellte Konzept für ein Gleichstromnetz setzt auf diesem Stand der Technik auf und stellt lokale Regelungszonen als Lösung zur Diskussion (c). Die Literatur bezeichnet diese häufig als Microgrids (engl. für Mikronetz).

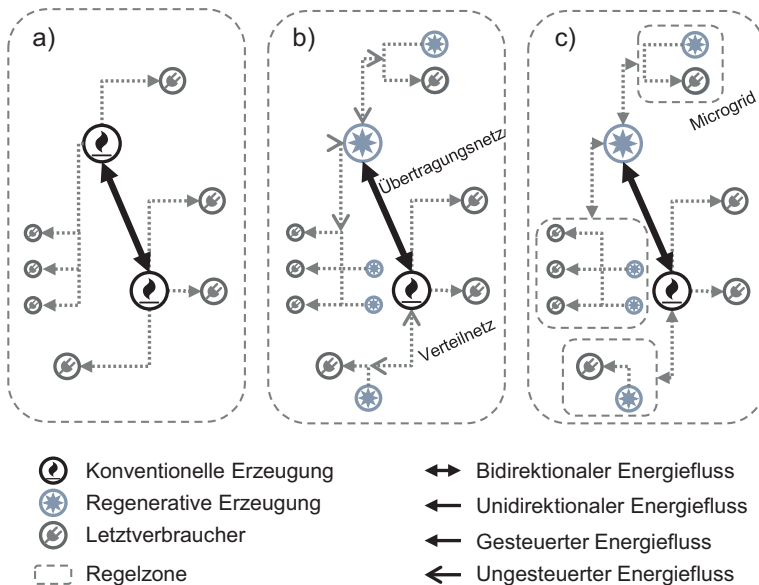


Bild 2.5 Wandel des Übertragungs- und Verteilnetzes zur Microgrid-Architektur

Die Idee eines „Microgrids“ wurde von dem amerikanischen Wissenschaftler Lasseter als erstes geprägt [Lass2002] und findet als Begriff in der Literatur ein sehr breites Anwendungsspektrum. Im Kontext des vorgestellten Gleichstromnetzkonzepts wird ein Microgrid als teilautark betriebenes elektrisches Netzsystem verstanden, welches lokale Verbraucher, dezentrale Erzeuger und Speichersysteme in einer Regelzone integriert. Das Netz wird als teilautark bezeichnet, da es nicht vollständig auf eine Anbindung an das externe Wechselstromnetz verzichtet, sondern vielmehr als Steuergröße in das überlagerte Netzregelungssystem integriert werden kann.

Diese Microgrid-Architektur hat makroskopische Vorteile für das gesamte Stromsystem, weil Energiespeicherung, -erzeugung und -verbrauch innerhalb der lokalen Regelzone in Echtzeit ausgeglichen wird. Damit werden lokale Ausgleichsvorgänge durch eine Veränderung der Einspeise- oder Verbrauchssituation nicht in das übergeordnete Netz übertragen. Gleichzeitig kann der Energiebezug von der übergeordneten Netzstruktur durch Einbindung in deren Netzregelung angepasst werden. Das Microgrid aggregiert die Anschlussleistung aller Geräte, sodass eine relevante Steuergröße für die nächste Regelungshierarchie entsteht.

Die lokale Netzregelung eröffnet ein Spektrum an Optimierungsoptionen für die Betriebsführung. So sind zum Beispiel die Netzausfallsicherheit, der Eigenverbrauch regenerativer Energien, die Lastspitzenkappung oder der energieflexible Betrieb von Verbrauchern mögliche Regelungsziele.

■ 2.3 Effiziente Energieversorgung

Zentrale Gleichrichtung/Verschmelzung der DC-Zwischenkreise

Wegfall der Gleichrichter in den Geräten

In einem DC-Netz wird die Energiewandlung vereinfacht. Während heute der Betrieb eines Antriebs mit Umrichter in einem AC-Netz einen Gleichrichter benötigt, entfällt die Gleichrichtung bei dem direkten Einsatz in einem DC-Netz. Soll das Gerät in einem AC-Netz rückspeisefähig sein, so muss ein zusätzlicher DC/AC-Wandler in Versorgungsnetzrichtung integriert werden. Dieser Wandler entfällt bei der direkten DC-Versorgung ebenfalls.

Die Effizienzverluste der zusätzlichen DC/AC-Wandler in Versorgungsnetzrichtung schätzt Hammerstrom pro Wandlung auf 2,5% [Hamm2007]. Laudani hat die Effizienz von Umrichtern unterschiedlicher Hersteller und unterschiedlicher Leistungsklassen bei verschiedenen Belastungen analysiert [Laud2015]. Es zeigt sich, dass Umrichter mit höherer Maximalleistung eine höhere Effizienz aufweisen. Unabhängig davon sinkt die Effizienz im Teillastbetrieb. Die Analysen deuten auf eine maximale Gesamteffizienz der Umrichter von nur 92,5% hin.

Bessere Auslegung des zentralen Gleichrichters möglich

Einen weiteren Effizienzgewinn kann ein DC-Netz durch eine zentralisierte Einspeisung erreichen. Die Verstetigung des Leistungsbedarfs in Netzen mit einer steigenden Anzahl von Teilnehmern führt zu einer besseren Auslastung des zentralen AC/DC-Wandlers am Versorgungspunkt.

Ein Teillastbetrieb von unter 60% führt hingegen zu zusätzlichen Effizienzverlusten von 2%.

Index

A

AC-Netz 9
AC-Netzausfall 131, 133
AC-Netzwiederkehr 131
Agent 121
Anforderungen 37
– allgemein 45
– Priorisierung 46
Anlage 117
Antriebstechnik
– Anforderungen 41
– Bewertung 68
– dezentrale Anwendungen 68
– technische Bewertung 66
Anwendungsbeispiel
– CNC-Bearbeitungszentrum 187
– Elektrohängebahn 195
– Intralogistiksystem 192
– Karosserierohbau 196
Aufteilungsgrenzen 184
Ausfallsicherheit 25, 29
Auslegung der Betriebsmittel 172
Auslegung von DC-Netzen 162
Autarkiegrad 168

B

Basisverbund 119
Betriebsbereiche 84
Brownfield-Planung 160

C

CO₂-Fußabdruck 22
Consumer 116 ff., 123
Cyber-Physisches System 121

D

DC-Abzweig 73, 77, 92 ff., 118
– dimensionieren 174
– Prinzipschaltung 92
– Vorladung 93, 96
DC-IT-Netz 90
DC-Netz 11, 14, 117, 121
– Anschaltung neues Gerät 103
– Effizienz 57
– entladen 104, 157
– Geräteklassen 76
– Struktur 73
– technische Bewertung 60
– Verbundteilnehmer 74
– Vorteile des DC-Netzes 15
– Zielstellung Antriebstechnik 57
DC-Zwischenkreis 12
dezentrale Energieerzeugung 160

E

Effizienz 170
Effizienzpotenziale 194
Einspeisung
– Anforderungen 42
Elektromobilität 4

EMV 104
 – Ableitströme 112
 – DC-Funkentstörfilter 111
 – Grenzwerte 107
 – Messergebnisse 109
 – Schnittstellen 105
 – Störabstrahlung 105
 – Störaussendung 106
 – Störfestigkeit 112
 – Stromüberschwingungen 112
 Energieeffizienz 18, 20
 Energieflexibilität 4, 26
 Energiespeichersysteme
 – auslegen 177
 Energieverbrauchsoptimierung 177
 Energieversorgungssystem 159
 Energieverteilanlage 163
 Energiewende 16
 Entladung 104
 Erdung 75, 88, 139
 – AC-seitig 88
 – Betriebserdung 90
 – Erdschlusskennung 94
 – Erdungswiderstand 90
 – IT-Netz 90
 – Mittelpunkterdung 155
 – Schutzerdung 90
 erneuerbare Energien 4, 15
 Erprobung der DC-Technologie 187

F

Filtereckfrequenz 124
 Flexibilitätspotenzial 170
 Frequenzumrichter 54
 – Effizienz 56
 – relative Platzbedarf der Bauteile 66
 – Topologie 55
 – Umstellung auf DC-Technik 63
 Funkentstörfilter 111

G

Geräteigenschaften 166
 Gerätekosten 30

Gerätetyp 167
 Gleichstromfabrik 13
 Greenfield-Planung 160
 Großsignaleffekte 123
 Gruppenregelung 80
 – dezentrale Gruppenregelung 120, 121
 – erweiterte Gruppenregelung 121
 Gütefaktor der Stabilität 126

H

Halbleiterschalter 149
 Hierarchieebenen 174
 Hilfsspannungsversorgung 97
 – dimensionieren 175
 Hybridleitungen 157
 Hybridschalter 145
 – Ausschaltoszilogramm 148

I

Impedanz 123
 Impedanzmessverfahren 127

K

Kapazitäten 157
 – Sicherheit 155
 Kennliniensteigung 137
 Kennlinienumschaltung 129
 Kleinsignalstabilität 122, 185
 Kommunikation 119 ff.
 Kondensator 24
 Kosteneinflussfaktoren 30
 Kostenunterschiede 30
 Kurzzeitunterbrechungen 27

L

Laderegelung 134
 Ladezustandsregelung 135, 137
 Ladezustandsregler 136
 Lastspitzenreduzierung 24 f., 178, 191

Lastzonen 73, 76, 118, 144
– Entladung 94
– Lastzonen definieren 174
Leistungsfluss 117ff., 121
Leistungsflussregelung 119 f.
Leistungsflusssteuerung 119 ff.
Leitungen und Stecker
– Anforderungen 43
lückender Betrieb 128

M

Materialeffizienz 62
Microgrid 17

N

Netzausfall 11, 179
Netz-Funktionen 168
Netzmanagement 115
– Anforderungen 44
– Kommunikation 45
– optimierte Betriebsführung 116, 118
– Ziel des Netzmanagements 117
Netzmanager 121
Netzqualität 5
Netzsystemdynamik 161

O

offenes DC-Netz 13

P

Parametrierungen der Geräte 166
Passivitätskriterium 123
Peak Shaving 134
Personenschutz 154
– kritische Bereiche 155
Planungsprämissen 171
Planungsprozess 164
private Netzabschnitte 163
Producer 117f., 123
Projektierung 163
Prosumer 115, 118, 134

R

Redundanz 169
Referenzprozess für die Auslegung 163
Regelkennlinie 79, 134 f.
Regelkurven 120
Rekuperation 19, 56
Rekuperationsenergie 130, 177
rekuperierte Energie 197
Ressourceneffizienz 3, 22, 24
Rippelspannung 67
Rückspeisung 11
Rückspeisung von Leistung 190

S

Schaltgerät 144
– Halbleiter 144, 149
– Hybrid 144 f.
– mechanisch 144
Schalt- und Schutztechnik
– Anforderungen 39
– Kurzschluss 40
– Not-Aus 40
– Not-Halt 39
Schutz
– Kurzschluss 93
– Überstrom 93
Schutzschalter 144
Selektivität 145, 152, 162, 170
Sicherungen 94
Spannung
– Maximalwert 93
– Minimalwert 94
Spannungsänderungsgeschwindigkeit 86
Spannungsband 83
Spannungsbereiche 183
Spannungsrippel 113
– Referenznetzwerk 113
Speicher 199
Speicherregler 136
Speichersysteme 160
Spule 148
Stabilität 170
Stabilitätsprobleme 123

steckbare Verbindungen 155
Steckverbindungen 155
– Austauschbarkeit 156
Stromkrieg 1
Stromrippe 112
Subnetz 118
SWOT-Analyse 48
– Chancen 50
– Risiken 50
– Schwächen 49
– Stärken 48

T

Teilnehmer 117ff.
– aktiv 120
– passiv 120
Teilnehmerklasse 117, 183
Transformation 161
transientes Verhalten 128

U

Überlastschutz 151
Über- und Unterspannung 84
Umfeldinformation 121
Umladeverluste 19

V

Versorgungsgerät
– Parallelbetrieb 78
– Regelkennlinie 79
Versorgungstechnik
– Anforderungen 42

Verteilnetz 163
Vorladewiderstand 93
Vorladung 93, 162
– Auslegung 97, 175
– Ebenen 95
– erstes Einspeisegerät 98
– Lastzone 100
– Nachladung 103
– Schaltschwellen 102
– Sequenz 99
– Speicher und Quellen 100
– Wartezeiten 99
Vor- und Nachteile
– AC-Technik 58
– DC-Technik 48, 60

W

Wandler 119f., 122
Wandlersysteme
– Einstellungen ermitteln 180
– kennlinienbasierte Regelung 181
– stationäre Zielzustände 181
Wandlungsverluste 6, 54
Widerstandsfähigkeit 168
Windkraftwerk 4
wirtschaftliches Potenzial 33

Z

Zustandsmanagement 122
Zustandsüberwachung 116
Zwischenkreiskapazität 68, 112