



D. Oeding  
B. R. Oswald

# Elektrische Kraftwerke und Netze

*8. Auflage*

 Springer Vieweg

D. Oeding · B. R. Oswald

---

Elektrische Kraftwerke und Netze

Dietrich Oeding · Bernd R. Oswald

# Elektrische Kraftwerke und Netze

8. Auflage

Mit 597 Abbildungen und 152 Tabellen

 Springer Vieweg

Dipl.-Ing. Dietrich Oeding  
Universitätsprofessor i. R.  
Institut für Elektrische Engergieversorgung  
Technische Universität Darmstadt

Dr.-Ing. habil. Bernd R. Oswald  
Universitätsprofessor i. R.  
Institut für Energieversorgung  
und Hochspannungstechnik  
Universität Hannover

ISBN 978-3-662-52702-3 978-3-662-52703-0 (eBook)  
DOI 10.1007/978-3-662-52703-0

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

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 1978, 2004, 2011, 2016

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

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.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

*Einbandentwurf:* WMXDesign GmbH

Gedruckt auf säurefreiem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature

Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

---

## Vorwort zur achten Auflage

Nach der Katastrophe im Kernkraftwerk Fukushima am 11.3.2011, ausgelöst durch einen Tsunami und das Profitstreben der Betreibergesellschaft, wurde in Deutschland gut drei Monate später unter weitgehender Zustimmung der Bevölkerung durch die deutsche Bundesregierung die Energiewende also der Ausstieg aus der Kernkraftnutzung bis spätestens 2022 beschlossen.

Diese Entscheidung macht den weiteren Ausbau der Erzeugung elektrischer Energie durch regenerative Quellen, also den Ausbau der Windkraftwerke an Land und in der Nord- und Ostsee und den Ausbau der Solarenergie in großen Windfarmen notwendig. Ebenso notwendig ist der Ausbau von Übertragungsleitungen aus dem Norden in den Süden der Republik (siehe die Abschnitte 12 und 19) sowie die Lösung der Reservefrage insbesondere für windstille Zeiten während des Winters.

Der sechsten Auflage aus dem Jahre 2004 wurde deshalb bereits der Abschnitt über Windkraftwerke (Windenergieanlagen) hinzugefügt, um dort die physikalischen Grundlagen zu behandeln und aufzuzeigen, dass die elektrische Leistung bei Windkraftwerken von der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit abhängt.

In der neuen Auflage wird nun ein Abschnitt 15.10 eingefügt, in dem der Beitrag von Windkraftwerken und großen Photovoltaikanlagen (Solarkraftwerken) zum Kurzschlussstrom im Drehstromnetz behandelt wird. In diesem neuen Abschnitt werden auch die in der zweiten Auflage der internationalen Norm IEC 60909-0: 2016 eingeführten Ergänzungen berücksichtigt, an deren Einführung die Verfasser maßgeblichen Anteil haben.

Bei der Berechnung der von Windkraftwerken gelieferten größten Kurzschlussströme, deren ausreichende Größe einerseits maßgebend ist für einen spannungsstabilen Netzbetrieb und andererseits für die Bemessung aller elektrischen Betriebsmittel, bedingt durch die Kraftwirkung und die thermische Erwärmung durch den maximalen Kurzschlussstrom, muß man unterscheiden zwischen älteren und kleineren Windkraftwerken mit Asynchrongeneratoren und neueren Anlagen bis 3 MVA an Land und bis etwa 6 MVA auf See mit doppelt speisenden Asynchrongeneratoren oder Windkraftwerken mit Vollumrichtern, bei denen die gesamte Leistung über einen Wechselrichter in der Drehstromnetz eingespeist wird. Bei Offshore Windparks in größerer Entfernung vom Festland wird die Leistung über eine HGÜ-Seekabelverbindung mit Gleichrichterstation auf hoher See und Wechselrichterstation an Land übertragen. Der Beitrag zum Anfangs-Kurzschlusswechselstrom des Dreh-

stromnetzes an Land liegt dann in der Größenordnung des Bemessungsstromes des Wechselrichters.

Große Solarkraftwerke (Photovoltaikanlagen) speisen ihre elektrische Leistung ebenfalls über Wechselrichter in das Mittelspannungs- bzw. Hochspannungsnetz ein und können somit bei der Kurzschlussstromberechnung so behandelt werden wie Windkraftwerke bzw. Windparks mit Vollumrichtern.

Windkraftwerke mit Vollumrichtern und Solarkraftwerke verhalten sich bei Kurzschluss im Drehstromnetz auf der Oberspannungsseite des Blocktransformators bei Windkraftwerken oder auf der OS-Seite des Solarkraftwerks-Transformators wie Stromquellen. Durch diese neu auftretende Besonderheit, die von den Netzbetreibern gefordert wird, wurde es notwendig die bewährte Methode mit der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle (Abschnitt 15.3.3) zur Berechnung des Anfangs-Kurzschlusswechselstromes durch eingeprägte Ströme von Kraftwerken (Wind- oder Solarkraftwerken) mit Vollumrichtern zu ergänzen.

Der neu aufgenommene Abschnitt 15.10 zeigt diese Vorgehensweise, wobei auch die von den Netzbetreibern geforderte Blindstrom-Spannungsfall-Charakteristik berücksichtigt werden kann, wenn auch mit erhöhtem Aufwand gegenüber der in der Neuauflage von IEC 60909-0: 2016 getroffenen auf der sicheren Seite liegende Annahme bei der Berechnung der größten Kurzschlussströme, dass unabhängig von der elektrischen Entfernung zwischen Kurzschlussstelle und Kraftwerk mit Vollumrichter immer der maximal mögliche Blindstrom (Kurzschlussstromanteil) eingespeist wird.

Eine Reihe von ausführlichen Beispielen zeigt die praktische Anwendung der Neuregelung.

Ober-Ramstadt, Hannover  
März 2016

D. Oeding  
B. R. Oswald

---

## Vorwort zur siebten Auflage

Die letzten Jahre haben gezeigt, dass durch starkes Wachstum der Weltbevölkerung insbesondere in Schwellenländern und Entwicklungsländern der CO<sub>2</sub>-Ausstoß weltweit zugenommen hat und dass es ungeheurer Anstrengungen in allen Ländern bedürfen wird, um die darauf zurückgeführte globale Erwärmung, die überraschenderweise von 1999 bis 2008 praktisch nicht mehr zugenommen hat, möglichst einzudämmen. Dieser Herausforderung wird die Menschheit nur begegnen können, wenn alle Länder und jeder Einzelne umdenkt, weniger Auto fährt, weniger Strom verbraucht, die Umwelt schont und sparsam mit allen Gütern der Erde umgeht.

Zu dieser Aufgabe gehört auch die schrittweise Umstellung der elektrischen Energieerzeugung auf erneuerbare Quellen. In dieser Auflage wird deshalb dem bereits in der sechsten Auflage eingefügten Abschnitt über Windenergieanlagen, die in Zukunft einen erheblichen Teil zur elektrischen Energieversorgung beitragen sollen, ein Abschnitt über den Leistungstransport von Windenergieanlagen auf dem offenen Meer zum Festland mit weiterentwickelter Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung eingefügt.

Die neue Auflage wird erweitert durch Abschnitte zur Berechnung der Nullimpedanz von Kabeln mit beidseitig geerdeten metallischen Mänteln oder Schirmen und der Berechnung des Reduktionsfaktors für diese Fälle sowie der zu erwartenden Verteilung des Rückstromes auf Mäntel und Erde bei einpoligem Kurzschluss. Diese Ergänzung trägt der Tatsache Rechnung, dass in zunehmendem Maße auch in Hochspannungsnetzen mit einer Spannung von 110 kV und darüber Kabel eingesetzt werden.

Um bei der Berechnung von Kurzschlussströmen in öffentlichen Niederspannungsnetzen und der Überprüfung der damit in Zusammenhang stehenden zuverlässigen Auslösung von Schutzeinrichtungen eine größere Klarheit zu vermitteln, wird dem bisherigen Kapitel Kurzschlussströme und Kurzschlussbeanspruchungen ein neuer Abschnitt für die Berechnung des größten dreipoligen Kurzschlussstromes und des kleinsten einpoligen Kurzschlussstromes in radial aufgebauten Niederspannungsnetzen hinzugefügt und mit einfachen Beispielen versehen unter Beachtung der internationalen Normenreihe IEC 60909.

Als neues Kapitel 20 wird eine ausführliche Anweisung zur Berechnung von transienten Vorgängen in Drehstromnetzen mit dem Differenzen-Leitwert-Verfahren aufgenommen und mit einem Beispiel für schnelle Ausgleichsvorgänge auf einer 380-kV-Freileitung anschaulich gemacht.

Formelzeichen Indizes werden weitgehend nach der neuen internationalen Norm IEC 60027-7 verwendet.

Die Verfassen danken den Lesern, die sie auf Fehler und Druckfehler aufmerksam gemacht haben, und wünschen der neuen Auflage eine gute Aufnahme.

Ober-Ramstadt, Hannover  
Februar 2011

D. Oeding  
B. R. Oswald



---

## Vorwort zur sechsten Auflage

Die Bedeutung der elektrischen Energie für das Leben der Menschen, die industrielle Produktion, die Mobilität und die Kommunikation hat seit der letzten Auflage des Buches im Jahre 1978 weiter stark zugenommen, auch wenn die Unsicherheiten bei der Bereitstellung der Primärenergie zur Umwandlung in elektrische Energie größer geworden sind. Die Kernkraftwerksunfälle in Three-Mile Island (USA) und in Tschernobyl (UdSSR) haben zu dieser Unsicherheit beigetragen, und in Deutschland sogar zu einem Ausstiegsbeschluss aus der friedlichen Nutzung der Kernenergie im Jahre 2001 geführt. Zu starker Verunsicherung hat auch die anhaltende Diskussion über Umweltschäden durch die Verbrennung fossiler Primärenergien wie Kohle und Erdöl/Benzin und die daraus entstehende Erwärmung der Erdatmosphäre geführt, auch wenn man heute noch nicht sicher sein kann, ob steigende mittlere Temperaturen nicht auch oder zusätzlich durch eine verstärkte Sonnenflecktätigkeit erklärbar sein könnten.

Nachdem man festgestellt hat, dass durch Energieeinsparmaßnahmen und effiziente Nutzung eine teilweise Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Anstieg des Primärenergieeinsatzes möglich ist, und in industriell entwickelten Ländern auch der Anstieg für die elektrische Energie stark zurückgegangen ist gegenüber den Jahrzehnten nach dem zweiten Weltkrieg, hat die Zeit rasch steigender Leistungen bei Kraftwerksblöcken sowie die Einführung immer neuer höherer Spannungsebenen bei 1000 kV ein Ende gefunden. Im Zuge der Ausweitung des Verbundbetriebes in Europa versucht man die vorhandenen Primärenergien und dabei insbesondere die Wasserenergie und andere regenerative Energien möglichst vollständig zu nutzen. Die eingeführte Liberalisierung des Strommarktes in Europa kann zur guten Ausnutzung der Kraftwerke und Netze führen und damit zu einem Abbau der hohen Verfügbarkeit, um so dem Konkurrenzdruck standhalten zu können. Die Bewährungsprobe des liberalisierten Strommarktes steht noch aus.

In den vergangenen Jahrzehnten sind Konstruktionen und Verfahren entwickelt worden zum sparsamen und umweltschonenden Umgang mit Primärenergie, zum Beispiel bei der Heizung und beim Automobil sowie insgesamt in der Industrie und im Haushalt. In einer Reihe von Industrieländern darunter auch in Deutschland hat man darüber hinaus eine starke staatliche Förderung regenerativer elektrischer Energieerzeugung durch Windkraftwerke und Solarzellen eingeleitet, dies in der Hoffnung, dass diese regenerativen

Quellen in einigen Jahrzehnten, wenn man auch große Offshore-Windparks verwirklicht hat, einen merklichen Anteil der fossilen Energieverbrennung zur elektrischen Energieerzeugung ersetzen zu können.

Immerhin wurde im Jahre 2002 der bisher größte Windpark Europas am Wybelsumer Polder bei Emden mit 54 Windenergieanlagen, die maximal zusammen 70 MW erzeugen können, in Betrieb genommen und damit erreicht, dass etwa 3 % der elektrischen Energie in Deutschland aus Windenergieanlagen bereitgestellt werden konnten.

Auch unter Berücksichtigung der hier angedeuteten Entwicklung erschien es angebracht, die fünfte Auflage zu überarbeiten und dem Stand der Technik anzupassen, wobei es wie in den vorangegangenen Auflagen das Ziel war, den Ingenieuren in der Praxis und den Studierenden ein Buch mit verlässlichen Grundlagen für die elektrische Energieversorgung in die Hand zu geben. Bei der Überarbeitung wurden einzelne Kapitel völlig neu bearbeitet, während andere dem Stand der Technik angepasst oder entsprechend ergänzt wurden. Das Kap. 4 zum Beispiel, in dem bei der fünften Auflage nur Wasserkraftwerke behandelt wurden, enthält in der neuen Auflage zusätzlich auch einen Abschnitt über Windkraftanlagen.

In ausreichendem Maße wurde in den Kap. 2, 5, 13, 14, 15, 16 und 18, die sich teilweise mit Berechnungen im Drehstromnetz beschäftigen, der verstärkten Verwendung von Programmen Rechnung getragen.

Kapitel 10 über Kabel wurde durch einen umfangreichen Anhang über die Mit- und Nullimpedanzen für Stromkreise aus vier Einleiter-Kunststoffkabeln ergänzt.

Vollständig neu bearbeitet wurde u. a. Kap. 15 über die Berechnung der Kurzschlussströme und ihrer Wirkungen, weil sich hier mit der Herausgabe der IEC-Normen 60909 (2001) und 60865 (1993), aufbauend auf der Basis der Vorarbeiten in Deutschland seit 1954 und der 1972 begonnenen internationalen Zusammenarbeit, sowie der weiteren dazugehörenden bis zum Jahre 2002 veröffentlichten Ergänzungen und Verbesserungen, ein weltweit anerkannter Standard auf diesem für die elektrische Energieversorgung wichtigen Feld herausgebildet hat.

Auch in der vorliegenden sechsten Auflage fand sich nicht genügend Raum für eine ausführliche Darstellung der Schutztechnik und der digitalen Leittechnik in Kraftwerken und Netzen der elektrischen Energieversorgung. Die Hütte, 29. Auflage, Elektrotechnik Band 3 Netze enthält eine ausführliche Darstellung. Aufgenommen wurde hier deshalb nur ein kurzer Überblick über die Aufgabe des Schutzes bei Kraftwerksblöcken und im Drehstromnetz mit Literaturhinweisen.

Formelzeichen und Nebenzeichen werden in weitgehender Anpassung an DIN 1304 und insbesondere an DIN 1304, Teil 3: „Formelzeichen für elektrische Energieversorgung“ gewählt. Die Indizes  $n$  und  $r$  für Nennwerte und Bemessungswerte werden nach DIN 40200 verwendet. Wesentliche Abweichungen ergeben sich damit nur gegen die veraltete Norm DIN 1304, Teil 7: „Formelzeichen für elektrische Maschinen“. Die Leiter des Drehstromnetzes

werden mit L1, L2, L3 bezeichnet. Die Kurzform 1, 2, 3 wird nicht verwendet. Die symmetrischen Komponenten können dann die Indizes 1, 2, 0 für das Mit-, Gegen- und Nullsystem erhalten. Bei Formelzeichen und Indizes in den Kap. 15 und 16 ergeben sich einige Abweichungen, weil hier eine weitgehende Anpassung an die genannten IEC-Normen erfolgte.

Das Vorwort der fünften Auflage wird unverändert abgedruckt in Erinnerung an Dr.-Ing. Hans Happoldt, Ehrenringträger des VDE, der im Jahre 1984 verstorben ist.

Die Verfasser danken den Firmen, die Bildmaterial zur Verfügung gestellt haben. Sie danken dem Springer-Verlag für die sorgfältige Ausführung der Zeichnungen und die gute Ausstattung des Buches. Sie wünschen der neuen Auflage eine gute Aufnahme.

Ober-Ramstadt, Hannover  
Januar 2004

D. Oeding  
B.R. Oswald

---

## Vorwort zur fünften Auflage

Die rasche Weiterentwicklung der elektrischen Energieerzeugung, ebenso wie die Entwicklungen auf dem Gebiet der Energie-Übertragung und -Verteilung, haben eine vollständige Neubearbeitung des Buches „Elektrische Kraftwerke und Netze“ von Buchhold/Happoldt notwendig gemacht.

Steigende Einheitenleistungen beim Bau von Kraftwerken, insbesondere bei Kernkraftwerken, ebenso wie steigende Einheitenleistungen bei Block- und Netztransformatoren und anderen Betriebsmitteln erzwingen die Steigerung der Übertragungsleistungen für Freileitungen und Kabel. Auf der einen Seite beobachtet man die verstärkte Erschließung großer abgelegener Wasserkräfte in Kraftwerken bis zu einigen Tausend MW mit der Übertragung der Leistung über Fernleitungen mit Drehstrom bis 765 kV und Gleichstrom bis  $\pm 533$  kV, während auf der anderen Seite verbrauchernahe große thermische Kraftwerke entstehen mit nur verhältnismäßig geringen Übertragungsentfernungen und hohen Anforderungen an die Verfügbarkeit und an die Beherrschung der Kurzschluss- und Erdkurzschlussströme.

Bei der Neubearbeitung wurde in verstärktem Maße die Darstellung und Berechnung der Drehstromnetze mit Hilfe der symmetrischen Komponenten aufgenommen. Die Berechnungsgleichungen wurden weitgehend den VDE-Bestimmungen angepasst. Hier wurde damit zahlreichen Anregungen aus dem Leserkreis Rechnung getragen. Formelzeichen und Indizes wurden ausgehend von DIN 4897 „Elektrische Energieversorgung-Formelzeichen“ gewählt. Um den Umfang der bisherigen Darstellung nicht wesentlich auszuweiten, wurde der Relais-Schutz von elektrischen Maschinen und Netzen nicht behandelt; hier ist auf die einschlägige Literatur zu verweisen.

Das Buch wendet sich an Ingenieure, die sich mit der Projektierung, dem Bau und dem Betrieb von Anlagen zur Erzeugung und Verteilung elektrischer Energie beschäftigen. Wir hoffen, dass es auch eine wertvolle Hilfe für die Studierenden der Fachrichtung Energietechnik sein wird.

Zum Dank sind die Verfasser zahlreichen Fachleuten verpflichtet, die Material und Anregungen beigesteuert haben. Hier sind besonders zu nennen die Herren Dr.-Ing. H. Schweikert, der den Abschnitt Wasserturbinen neu gestaltete, Dipl.-Ing. K.H. Schüller und Mitarbeiter, die die Neufassung des Abschnittes Wärmekraftwerke unterstützten, Dipl.-Ing. R.-D. Steckel und Stud.-Ass. E. Zimmermann, die wertvollen Anregungen gegeben und den Abschnitt über die Kabelbelastbarkeit neu bearbeitet haben, Dipl.-Ing. J. Stenzel, der den

Abschnitt Sternpunktbehandlung und Erdung in Hochspannungsnetzen neu zusammengestellt hat, und Dipl.-Ing. H. P. Lips, der den Abschnitt Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung überarbeitet hat, sowie weiterhin den Fachkollegen, die sich die Mühe der Durchsicht und Korrektur unterzogen haben.

Die Verfasser danken den Firmen, die Unterlagen und Bildmaterial zur Verfügung gestellt haben.

Für die gute Ausstattung und die sorgfältige Ausführung der Zeichnungen danken die Verfasser dem Springer-Verlag und wünschen dem neubearbeiteten Buch eine gute Aufnahme bei den Ingenieuren der Praxis und den Studierenden der Energietechnik.

Weinheim, Mannheim  
Dezember 1977

H. Happold  
D. Oeding

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Allgemeines zur elektrischen Energieversorgung . . . . .</b>	<b>1</b>
1.1	Einführung, Primärenergie und elektrische Energie . . . . .	1
1.2	Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie .	7
<b>2</b>	<b>Grundlagen zur Berechnung in Drehstromnetzen . . . . .</b>	<b>15</b>
2.1	Überblick. . . . .	15
2.2	Komplexe Größen. . . . .	15
2.2.1	Die Transformation zeitlich sinusförmig verlaufender Größen in die komplexe Ebene . . . . .	15
2.2.2	Die komplexe Leistung im Wechsel- und Drehstromnetz . . . .	17
2.3	Zählpeile und Zählpeilsysteme. . . . .	20
2.4	Symmetrische Komponenten . . . . .	28
2.4.1	Allgemeines . . . . .	28
2.4.2	Symmetrierung und Entsymmetrierung. . . . .	28
2.4.3	Impedanzen im Mit-, Gegen- und Nullsystem. . . . .	33
2.4.4	Drehstromleistung und Komponentenleistungen. . . . .	36
2.5	Modale Komponenten . . . . .	37
2.5.1	Allgemeiner Ansatz . . . . .	38
2.5.2	Bestimmung der Transformationsmatrix . . . . .	40
2.5.3	Transformation von Zeigergrößen . . . . .	41
2.5.4	Leistung in modalen Komponenten. . . . .	42
2.5.5	Gebräuchliche Komponentensysteme . . . . .	43
<b>3</b>	<b>Thermische Kraftwerke . . . . .</b>	<b>49</b>
3.1	Allgemeines . . . . .	49
3.2	Grundlast-, Mittellast- und Spitzenlastanlagen . . . . .	53
3.3	Thermische Prozesse, Wirkungsgrad . . . . .	57
3.4	Kraft-Wärme-Kopplung . . . . .	76
3.5	Dampfturbine . . . . .	80
3.6	Allgemeine Anordnung in Dampfkraftwerken . . . . .	83
3.7	Nukleare Dampferzeugung – Kernkraftwerke. . . . .	88
<b>4</b>	<b>Wasserkraftwerke und Windkraftwerke . . . . .</b>	<b>95</b>
4.1	Bedeutung . . . . .	95
4.2	Wasserkraftgeneratoren . . . . .	96

4.3	Wasserturbinen . . . . .	98
4.4	Laufwasser- und Speicherkraftwerke . . . . .	104
4.5	Windkraftwerke . . . . .	113
<b>5</b>	<b>Drehstromgeneratoren</b> . . . . .	<b>121</b>
5.1	Allgemeines . . . . .	121
5.2	Gleichungssystem der Synchronmaschine . . . . .	128
5.3	Stationärer Betrieb . . . . .	132
5.4	Leerlauf- und Kurzschlusskennlinie. . . . .	142
5.5	Nichtstationärer Betrieb . . . . .	144
5.5.1	Operatorengleichungen . . . . .	145
5.5.2	Zeitlicher Stromverlauf bei dreipoligem Klemmenkurzschluss . . . . .	149
5.5.3	Kurzschlussdrehmomente und Fundamentbeanspruchung . . . . .	154
5.5.4	Ersatzschaltungen für den subtransienten und den transienten Zustand . . . . .	163
<b>6</b>	<b>Generator- und Turbinenregelung</b> . . . . .	<b>169</b>
6.1	Erregungseinrichtungen . . . . .	169
6.2	Spannungsregelung . . . . .	173
6.2.1	Statik der Spannungsregelung. . . . .	173
6.2.2	Spannungsregelung eines Turbogenerators . . . . .	173
6.3	Turbinenregelung . . . . .	182
6.3.1	Bilanzmodell des Netzes . . . . .	182
6.3.2	Primärregelung . . . . .	185
6.3.3	Sekundärregelung. . . . .	188
<b>7</b>	<b>Eigenbedarfsanlagen in Kraftwerken</b> . . . . .	<b>193</b>
7.1	Aufgabe des Eigenbedarfs . . . . .	193
7.2	Aufbau von Eigenbedarfsnetzen, Prinzipschaltung . . . . .	194
7.2.1	Auswahl der Eigenbedarfstransformatoren . . . . .	196
7.2.2	Niederspannungsversorgung . . . . .	197
7.3	Sicherstellung des Eigenbedarfs in thermischen Kraftwerken . . . . .	199
7.3.1	Grundüberlegungen . . . . .	199
7.3.2	Reserveversorgung des Eigenbedarfs . . . . .	199
7.3.3	Notstillsetzen des Blockes, Notstromversorgung . . . . .	203
7.4	Spannungshaltung und Schnellumschaltung . . . . .	204
7.4.1	Spannungseinbruch beim Einschalten von Motoren . . . . .	204
7.4.2	Umschaltung des Eigenbedarfs . . . . .	207
7.5	Schutz von Kraftwerksblöcken . . . . .	213
7.5.1	Allgemeines . . . . .	214
7.5.2	Schutzmaßnahmen für Kraftwerksblöcke . . . . .	215
<b>8</b>	<b>Transformatoren</b> . . . . .	<b>219</b>
8.1	Einsatz der Transformatoren. . . . .	219
8.2	Schaltgruppen und Schaltungen. . . . .	221

8.3	Zwei- und Dreiwicklungstransformatoren . . . . .	225
8.3.1	Ersatzschaltung und Zeigerdiagramm . . . . .	225
8.3.2	Leistungsaufnahme und Spannungsänderung bei Belastung . .	229
8.3.3	Dreiwicklungstransformatoren . . . . .	231
8.3.4	Nullsystem und Sternpunktbelastbarkeit . . . . .	235
8.3.5	Rushströme beim Einschalten . . . . .	238
8.4	Wicklungen und Stufenschalter . . . . .	241
8.5	Spartransformatoren . . . . .	245
8.6	Ersatzschaltungen in symmetrischen Komponenten . . . . .	248
8.6.1	Impedanzersatzschaltungen . . . . .	248
8.6.2	Admittanzersatzschaltungen. . . . .	255
8.6.3	Ersatzschaltungen ohne Übertrager . . . . .	257
<b>9</b>	<b>Freileitungen</b> . . . . .	<b>259</b>
9.1	Mastformen, Kosten. . . . .	259
9.2	Aufbau der Freileitungen. . . . .	262
9.3	Mittlere geometrische Abstände. . . . .	267
9.4	Impedanzen . . . . .	272
9.4.1	Allgemeines . . . . .	272
9.4.2	Selbst- und Gegenimpedanzen von Leiterschleifen . . . . .	273
9.4.3	Impedanzen in symmetrischen Komponenten . . . . .	282
9.4.4	Induktive Beeinflussung . . . . .	291
9.5	Kapazitäten . . . . .	293
9.5.1	Allgemeines . . . . .	293
9.5.2	Selbst- und Gegenpotenzialkoeffizienten von Leiterschleifen . .	295
9.5.3	Admittanzen in symmetrischen Komponenten . . . . .	299
9.5.4	Oberflächenrandfeldstärke. . . . .	304
9.6	Die Leitung im stationären Betrieb . . . . .	307
9.6.1	Leitungsgleichungen . . . . .	307
9.6.2	Ersatzschaltungen für die kurze Leistung . . . . .	309
9.6.3	Wellenwiderstand und natürliche Leistung . . . . .	310
9.6.4	Verluste, wirtschaftliche Stromdichte. . . . .	312
9.7	Wirkung der Freileitungen auf den Menschen. . . . .	315
9.7.1	Elektrische und magnetische Feldstärke am Erdboden . . . . .	315
9.7.2	HF-Störfeldstärke und Geräuschpegel . . . . .	321
<b>10</b>	<b>Kabel</b> . . . . .	<b>325</b>
10.1	Allgemeines . . . . .	325
10.2	Aufbau der Kabel . . . . .	325
10.3	Kabelauslegung und Belastbarkeit . . . . .	331
10.3.1	Allgemeine Überlegungen . . . . .	331
10.3.2	Strombelastbarkeit . . . . .	332
10.3.3	Verlustberechnung . . . . .	334
10.3.4	Wärmewiderstände . . . . .	339
10.3.5	Normalbedingungen für Kabelbelastung und Häufung . . . . .	341



10.3.6	Kabelbelastung bei Bodenaustrocknung und wechselnder Last	344
10.4	Impedanzen und Kapazitäten . . . . .	348
10.4.1	Impedanzen im Mit- und Nullsystem. . . . .	348
10.4.2	Mit- und Nullimpedanz von Drehstromkabeln mit geerdeten metallischen Mänteln oder Schirmen. . . . .	356
10.4.3	Kapazitäten, Ladeleistungen und kapazitiver Erschlussstrom . . . . .	366
10.5	Hochspannungs- und Hochleistungskabel. . . . .	369
<b>11</b>	<b>Schalter und Schaltanlagen</b> . . . . .	<b>377</b>
11.1	Leistungsschalter . . . . .	377
11.1.1	Anforderungen an Leistungsschalter . . . . .	377
11.1.2	Ölschalter, ölarme Schalter. . . . .	380
11.1.3	Vakuumschalter . . . . .	380
11.1.4	Druckluftschalter . . . . .	382
11.1.5	Generatorschalter . . . . .	385
11.1.6	SF <sub>6</sub> -Schalter . . . . .	385
11.2	Schaltanlagen . . . . .	387
11.2.1	Allgemeines . . . . .	387
11.2.2	Schaltungen in Schaltanlagen . . . . .	388
11.2.3	Innenraum- und Freiluftschaltanlagen. . . . .	391
11.2.4	Vollgekapselte, SF <sub>6</sub> -isolierte Schaltanlagen. . . . .	394
<b>12</b>	<b>Drehstromnetze</b> . . . . .	<b>399</b>
12.1	Netzaufbau, Verbundnetz. . . . .	399
12.2	Höchstspannungsübertragung . . . . .	402
12.3	Versorgung großer Städte oder Ballungsräume . . . . .	409
12.4	Verteilungsnetze. . . . .	415
12.5	Industrielle Stromversorgung . . . . .	422
12.6	Blindleistungsbedarf und Kompensation . . . . .	424
12.6.1	Blindleistungsbedarf der Verbraucher . . . . .	424
12.6.2	Blindleistungsbedarf des Netzes. . . . .	429
12.6.3	Blindleistungskompensation. . . . .	431
12.6.4	Parallelresonanz und Absaugung von Stromüberschwingungen . . . . .	437
12.7	Netzschutz . . . . .	443
12.7.1	Überblick. . . . .	443
12.7.2	Leitungsschutz. . . . .	445
12.7.3	Transformatorschutz . . . . .	447
<b>13</b>	<b>Mathematische Beschreibung des Drehstromnetzes</b> . . . . .	<b>451</b>
13.1	Netzumformungen . . . . .	451
13.2	Gleichungssysteme mit Admittanz-, Impedanz- und Hybridmatrix. . . . .	451
13.2.1	Knotenpunktverfahren, Admittanzmatrix . . . . .	453
13.2.2	Impedanzmatrix. . . . .	457
13.2.3	Hybridmatrix . . . . .	461

13.3	Quer- und Längsunsymmetrien . . . . .	467
13.4	Einfachquerfehler . . . . .	473
13.4.1	Strom-Spannungsbeziehungen an der Fehlerstelle . . . . .	474
13.4.2	Einpoliger Erdkurzschluss . . . . .	478
13.5	Einfachlängsfehler . . . . .	480
13.5.1	Strom-Spannungsbeziehungen an der Fehlerstelle . . . . .	480
13.5.2	Einpoliger Längsfehler . . . . .	481
13.5.3	Zweipoliger Längsfehler . . . . .	483
13.6	Doppelerdkurzschluss und andere Doppelfehler . . . . .	484
13.7	Fehlermatrizenverfahren . . . . .	490
13.7.1	Fehlerbedingungen . . . . .	492
13.7.2	Nachbildung von Kurzschlüssen an der Admittanzmatrix . . . . .	493
13.7.3	Nachbildung von Unterbrechungen an der Admittanzmatrix . . . . .	495
13.7.4	Nachbildung von Kurzschlüssen an der Impedanzmatrix . . . . .	498
13.7.5	Nachbildung von Kurzschlüssen und Unterbrechungen in modalen Komponenten . . . . .	498
<b>14</b>	<b>Leistungsfluss im Drehstromnetz . . . . .</b>	<b>499</b>
14.1	Aufgabe . . . . .	499
14.2	Leistungsfluss auf Leitungen . . . . .	499
14.2.1	Vorgabe der Belastung als konstante Impedanz . . . . .	501
14.2.2	Vorgabe der Belastung durch konstanten Strom . . . . .	502
14.2.3	Vorgabe der Belastung durch konstante Leistung . . . . .	505
14.2.4	Vorgabe der Abnahmeleistungen als Funktion der Spannung . . . . .	506
14.2.5	Leistungsfluss auf Leitungen bei mehreren Abnahmen . . . . .	507
14.2.6	Leistungsfluss in Ringnetzen . . . . .	510
14.3	Leistungsfluss in vermaschten Netzen . . . . .	511
14.3.1	Methoden der Leistungsflussberechnung – Einführung . . . . .	511
14.3.2	Knotenpunktverfahren . . . . .	515
14.3.3	Newton-Verfahren . . . . .	522
14.3.4	Entkoppelte Leistungsflussberechnung . . . . .	524
14.3.5	Gleichstromleistungsflussberechnung . . . . .	526
<b>15</b>	<b>Kurzschlussströme und Kurzschlussbeanspruchungen . . . . .</b>	<b>529</b>
15.1	Einführung . . . . .	529
15.2	Zeitlicher Verlauf des Kurzschlussstromes . . . . .	533
15.3	Methoden zur Berechnung der Kurzschlussströme . . . . .	539
15.3.1	Allgemeines . . . . .	539
15.3.2	Überlagerungsverfahren . . . . .	539
15.3.3	Verfahren mit der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle . . . . .	546
15.4	Nachbildung der Betriebsmittel beim Verfahren mit der Ersatzspannungsquelle an der Kurzschlussstelle . . . . .	551
15.4.1	Allgemeines . . . . .	551
15.4.2	Netzeinspeisungen . . . . .	552

15.4.3	Leitungen (Freileitungen und Kabel) . . . . .	554
15.4.4	Transformatoren . . . . .	555
15.4.5	Generatoren. . . . .	561
15.4.6	Kraftwerksblöcke mit Stufenschalter. . . . .	565
15.4.7	Kraftwerksblöcke ohne Stufenschalter. . . . .	572
15.4.8	Korrekturfaktoren bei Kurzschluss zwischen Generator und Blocktransformator. . . . .	575
15.4.9	Motoren . . . . .	582
15.5	Kurzschlussströme und ihre Berechnung . . . . .	585
15.5.1	Allgemeines. . . . .	585
15.5.2	Anfangs-Kurzschlusswechselstrom. . . . .	592
15.5.3	Stoßkurzschlussstrom . . . . .	609
15.5.4	Ausschaltstrom . . . . .	617
15.5.5	Dauerkurzschlussstrom . . . . .	624
15.5.6	Beitrag von Asynchronmotoren zum Kurzschlussstrom. . . . .	628
15.5.7	Thermisch gleichwertiger Kurzschlussstrom und Joule-Integral	640
15.6	Berechnung der Kurzschlussströme im per-unit- oder im %/MVA-System . . . . .	652
15.6.1	Physikalische, relative und semirelative Größen . . . . .	652
15.6.2	Definition der Größen des p. u.-Systems und des %/MVA-Systems . . . . .	654
15.6.3	Kurzschlussstromberechnung im %/MVA-System . . . . .	655
15.7	Mechanische und thermische Kurzschlussfestigkeit . . . . .	661
15.7.1	Grundüberlegungen zu Kurzschlusskräften. . . . .	661
15.7.2	Beanspruchung biegesteifer Leiter und Stützpunkt- beanspruchung . . . . .	668
15.7.3	Beanspruchung in Hochspannungsanlagen mit Seilen . . . . .	683
15.7.4	Thermische Kurzschlussfestigkeit . . . . .	689
15.8	Begrenzung der Kurzschlussströme . . . . .	694
15.9	Kurzschlussstromberechnung in Niederspannungsnetzen . . . . .	699
15.9.1	Allgemeines. . . . .	699
15.9.2	Berechnung der Kurzschlussströme . . . . .	700
15.9.3	Berechnungsbeispiel Niederspannung-Hausanschluss . . . . .	710
15.9.4	Maximal zulässige Leitungslänge von Niederspannungs- Endstromkreisen in TN-Netzen . . . . .	718
15.10	Beitrag von Windkraftwerken und Photovoltaikanlagen zum Kurzschlussstrom. . . . .	723
15.10.1	Allgemeines. . . . .	723
15.10.2	Windkraftwerke mit doppelt speisenden Asynchron- generatoren . . . . .	727
15.10.3	Windkraftwerke mit Vollumrichtern und Photovoltaik- anlagen . . . . .	748
15.10.4	Windparks bestehend aus Windkraftwerken mit doppelt speisenden Asynchrongeneratoren und Windkraftwerken mit Vollumrichtern. . . . .	766

<b>16</b>	<b>Sternpunktbehandlung und Erdung in Hochspannungsnetzen</b>	773
16.1	Überblick. . . . .	773
16.2	Sternpunktbehandlung. . . . .	776
16.2.1	Einführung. . . . .	776
16.2.2	Netze mit isoliertem Sternpunkt . . . . .	776
16.2.3	Netze mit Erdschlusskompensation. . . . .	778
16.2.4	Netze mit niederohmiger Sternpunkterdung . . . . .	782
16.3	Sternpunktbehandlung auf der OS- und US-Seite eines Yy0 d5-Transformators. . . . .	784
16.4	Erdung in Hochspannungsnetzen. . . . .	788
16.4.1	Über Erde fließende Teilkurzschlussströme . . . . .	788
16.4.2	Schleifenimpedanzen, Erdseilreduktionsfaktoren und Kettenleiterimpedanzen. . . . .	792
16.4.3	Erdkurzschluss in der Nähe einer Anlage . . . . .	798
16.5	Stromverteilung für Kabel mit geerdeten Mänteln (Schirmen) bei Erdkurzschluss . . . . .	804
16.5.1	Stromverteilung und Reduktionsfaktor bei Dreileiterkabeln . . . . .	805
16.5.2	Stromverteilung und Reduktionsfaktor bei Einleiterkabeln . . . . .	811
16.6	Ausbreitungswiderstände von Erdern und Erdungsanlagen. . . . .	816
16.7	Bau von Erdungsanlagen und Erdungsmessungen . . . . .	820
16.8	Beeinflussung . . . . .	826
<b>17</b>	<b>Überspannungen und Isolationskoordination</b> . . . . .	833
17.1	Übersicht. . . . .	833
17.2	Spannungserhöhungen. . . . .	834
17.2.1	Zeitweilige Spannungserhöhung bei Erdschluss . . . . .	834
17.2.2	Zeitweilige Spannungserhöhung bei Lastabwurf, Ferranti-Effekt . . . . .	834
17.2.3	Spannungserhöhung durch kapazitive Unsymmetrie . . . . .	840
17.2.4	Resonanzüberspannungen . . . . .	841
17.3	Innere Überspannungen . . . . .	842
17.3.1	Transiente Erdschlussüberspannungen. . . . .	842
17.3.2	Überspannungen beim Schalten kleiner induktiver Ströme . . . . .	845
17.3.3	Überspannungen beim Schalten von Kondensatoren und Leitungen . . . . .	852
17.3.4	Überspannungen beim Ausschalten von Kurzschlussströmen . . . . .	857
17.4	Äußere Überspannungen. . . . .	865
17.4.1	Überblick. . . . .	865
17.4.2	Atmosphärische Entladung und Blitzeinschlag . . . . .	866
17.4.3	Wanderwellen auf Leitungen . . . . .	868
17.5	Isolationsminderung . . . . .	877
17.6	Isolationskoordination . . . . .	882
17.7	Auswahl und Einsatz von Überspannungsableitern. . . . .	886
17.7.1	Funkenstreckenableiter. . . . .	886
17.7.2	Metalloxidableiter. . . . .	889
17.7.3	Ableiterabsatz . . . . .	890

<b>18</b>	<b>Stabilität der Drehstromübertragung</b> . . . . .	899
18.1	Einführung, Begriff der Stabilität, Modellbildung. . . . .	899
18.2	Statische Stabilität. . . . .	904
18.2.1	Statische Stabilität ohne Regelung. . . . .	904
18.2.2	Statische Stabilität mit Regelung . . . . .	908
18.2.3	Selbsterregung. . . . .	912
18.3	Transiente Stabilität. . . . .	915
18.3.1	Einflussgrößen und Untersuchungsmethode . . . . .	915
18.3.2	Transiente Stabilität abhängig von Kurzschlussart, -dauer und Netzaufbau . . . . .	919
18.3.3	Stabilitätsverlust und Resynchronisierung. . . . .	924
18.3.4	Einfluss von Generatorauslegung und Erregersystem auf die transiente Stabilität . . . . .	929
<b>19</b>	<b>Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung.</b> . . . . .	933
19.1	Wirkungsweise . . . . .	933
19.2	Technische Besonderheiten der HGÜ gegenüber der DHÜ . . . . .	935
19.3	Entwicklung der HGÜ . . . . .	935
19.4	Betriebsmittel der HGÜ . . . . .	939
19.4.1	Gesamtanordnung . . . . .	939
19.4.2	HGÜ-Stationen . . . . .	942
19.4.3	HGÜ-Freileitungen und -Kabel . . . . .	945
19.5	Kostenvergleich HGÜ mit DHÜ . . . . .	948
19.6	Weiterentwicklung der HGÜ . . . . .	949
<b>20</b>	<b>Berechnung transienter Vorgänge in Drehstromnetzen</b> . . . . .	953
20.1	Überblick. . . . .	953
20.2	Gleichungssysteme zur Berechnung transienter Vorgänge. . . . .	953
20.3	Differenzen – Leitwert – Verfahren . . . . .	956
20.3.1	Diskretisierungsverfahren . . . . .	956
20.3.2	Differenzgleichungen der induktiven Zweige . . . . .	958
20.3.3	Differenzgleichungen der kapazitiven Zweige . . . . .	959
20.3.4	Differenzgleichungen der resistiven Zweige . . . . .	961
20.3.5	Differenzgleichungen der Leitungen . . . . .	961
20.3.6	Differenzgleichungssystem des Netzes . . . . .	970
20.3.7	Einschalten einer 380-kV-Freileitung. . . . .	972
<b>Anhang</b>	. . . . .	979
<b>Formelzeichen und Nebenzeichen.</b>	. . . . .	1053
<b>Literatur</b>	. . . . .	1059
<b>Sachverzeichnis</b>	. . . . .	1101

---

# 1 Allgemeines zur elektrischen Energieversorgung

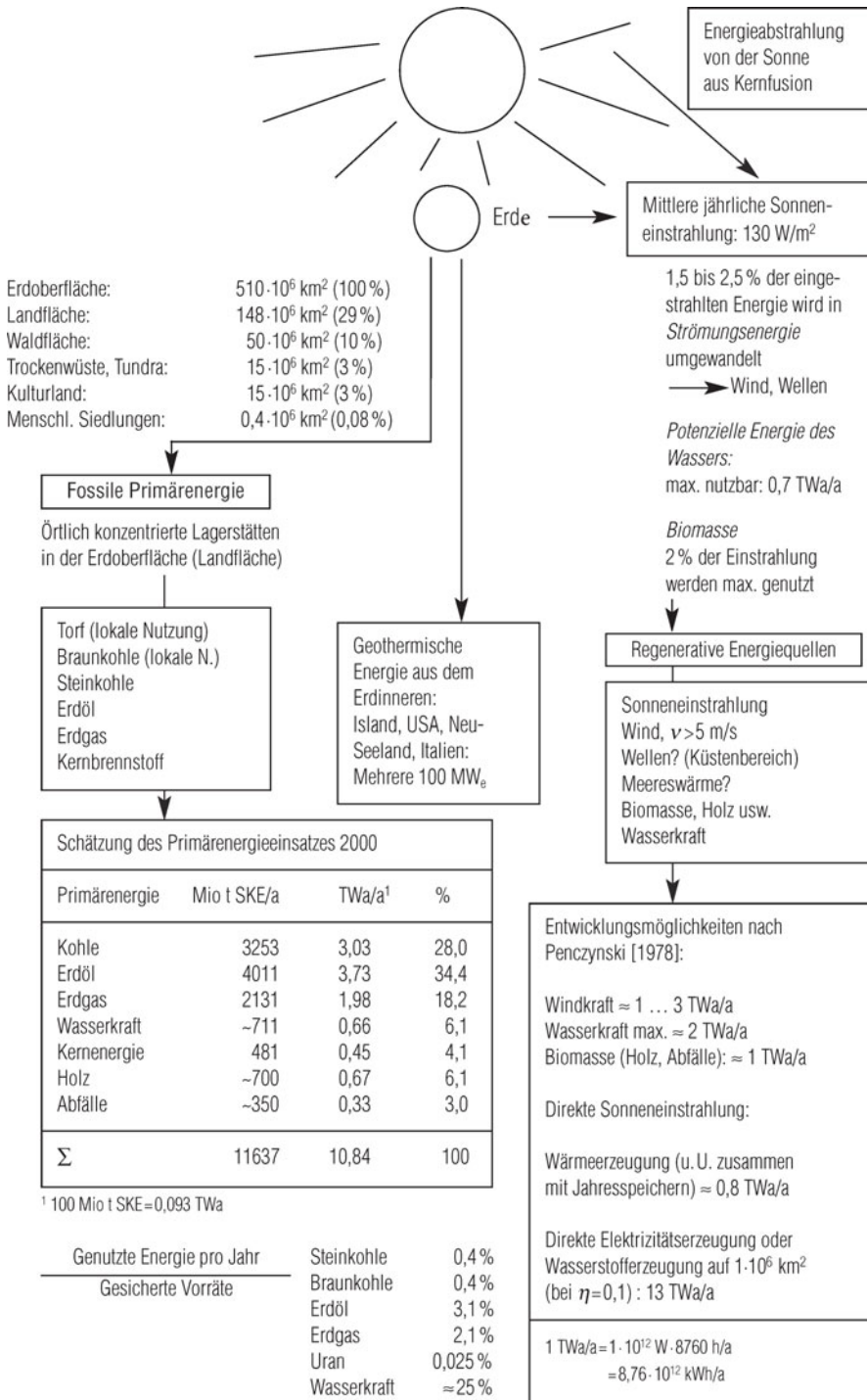
## 1.1 Primärenergie und elektrische Energie

Bis ins zwanzigste Jahrhundert kannte man als Energiequelle nur die Sonne, entweder in der direkten Einstrahlung der Sonnenenergie auf die Erde oder in den fossilen Brennstoffen, die über lange Zeiten mit Hilfe der Sonnenenergie aufgebaut wurden. Hinzugekommen sind Energiequellen aus der Kernspaltung oder der Kernverschmelzung, die extrem ergiebige Energiequellen darstellen können. In [1.36] findet man einen breiten Überblick über alle bekannten Energieformen.

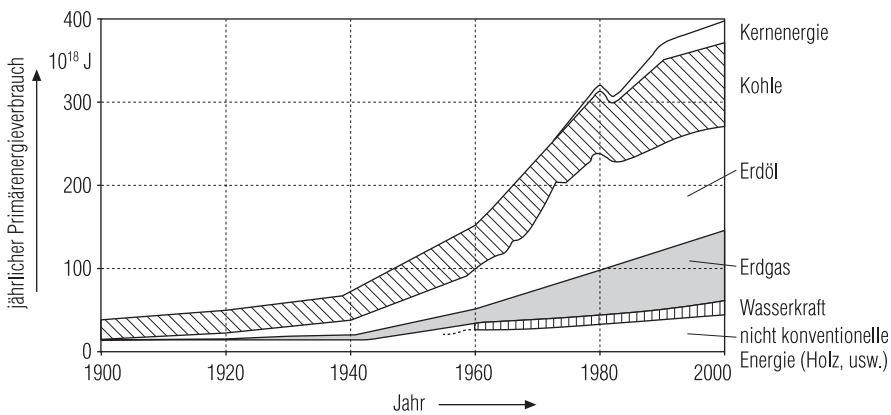
Bild 1.1 stellt das globale Energie-Szenario dar. Bis heute lebt die Menschheit im wesentlichen von den fossilen Energiequellen Kohle, Erdöl und Erdgas mit zusammen etwa 80 % des geschätzten Primärenergieeinsatzes. Regenerative Energiequellen wie Wasser, Wind, Holz und die Nutzung der direkten Sonneneinstrahlung in Solarzellen (photothermische, photochemische und photovoltaische Konversion) decken bisher nur einen verhältnismäßig geringen Anteil von etwa 13 % des geschätzten Primärenergieeinsatzes. Aus Kernkraftwerken kommen etwa 4%. Die große Hoffnung auf die unerschöpfliche Energiequelle der Kernfusion hat sich bisher nicht erfüllt [1.36].

Es besteht die Befürchtung, dass die leicht gewinnbaren Erdöl- und die Erdgasvorräte bei weiter stark steigendem Verbrauch in der Mitte des 21ten Jahrhunderts so knapp werden, dass internationale Konflikte um deren Verteilung entstehen könnten. Notwendig ist es daher auch mit Rücksicht auf die globale Erwärmung, sowohl regenerative Energien weiter zu fördern und zu entwickeln, wie das gegenwärtig in Deutschland mit der Windenergie und Solarenergie getan wird, als auch die Kernenergie weiter zu nutzen bei zusätzlichen Anstrengungen für die Sicherheit. Seit dem Reaktorunfall in Tschernobyl im Jahre 1986 ist der größere Teil der Bevölkerung in Deutschland jedoch gegen die Nutzung der Kernenergie, so dass in absehbarer Zeit der Neubau von Kernkraftwerken in Deutschland undenkbar erscheint.

Der endgültige Ausstieg aus der Kernenergienutzung zur Stromerzeugung in Deutschland ist für 2022 geplant. Aus diesen Überlegungen ergibt sich, dass ein äußerst sparsamer Umgang mit Primärenergie und auch elektrischer Energie selbstverständlich werden muss. Hier soll nur beispielhaft auf die notwendige Verbesserung der Wärmeisolierung und der Heiztechnik in Gebäuden und den



**Bild 1.1.** Globales Energieszenario



**Bild 1.2.** Jährlicher Energieverbrauch auf der Welt unterteilt nach Energieträgern

minimierten Kraftstoffeinsatz für Automobile hingewiesen werden, um so Primärenergie einzusparen.

Bild 1.2 zeigt den Anstieg des jährlichen Weltenergieverbrauchs aufgeteilt auf die einzelnen Primärenergiearten. Man erkennt auch aus diesem Bild, dass die fossilen Energieträger den weitaus größten Anteil beisteuern. Der jährliche Gesamtenergieverbrauch erreichte bei 6 Mrd. Einwohnern im Jahr 2000 etwa  $400 \text{ EJ} = 400 \cdot 10^{18} \text{ J} = 13,7 \cdot 10^9 \text{ t SKE}$  (Tonnen Steinkohleneinheiten) [1.36].

Der Anteil der zur Erzeugung elektrischer Energie (Umwandlung in elektrische Energie) eingesetzten Primärenergie am Gesamtenergiebedarf betrug in Deutschland im Jahre 1920 etwa 7% und hat sich im Jahre 1970 auf 24% erhöht. Im Jahre 2000 betrug dieser Anteil in Deutschland rund 34%, wobei für die Umwandlung von Primärenergie in elektrische Energie ein Wirkungsgrad von 40% angesetzt wurde. Weltweit betrug dieser Anteil im Jahre 2000 schätzungsweise 32% bei einem jährlichen Energieverbrauch von  $400 \text{ EJ} = 111,1 \cdot 10^{12} \text{ kWh}$  und einer Weltproduktion an elektrischer Energie von  $14,2 \cdot 10^{12} \text{ kWh}$  in öffentlichen und industriellen Kraftwerken (nach UN und EU), wenn man auch hier wieder den günstigen Wert von 40% für den Wirkungsgrad bei der Umwandlung von Primärenergie in elektrische Energie annimmt.

Tabelle 1.1 zeigt die zeitliche Entwicklung der elektrischen Energieerzeugung einzelner ausgewählter Länder im Zeitraum von 1960 bis zum Jahr 2008.

Die in früheren Jahrzehnten beobachteten Steigerungsraten der elektrischen Energieerzeugung in Industrieländern von etwa 7%/a, die zu einer Verdoppelung in 10 Jahren führten, sind heute infolge höherer Energieeffizienz, des geringen wirtschaftlichen Wachstums und eines Bewusstseinswandels in der Bevölkerung nicht mehr zu beobachten. Eine Ausnahme stellt die elektrische Energieerzeugung in China dar. Dort hat sich in den letzten 20 Jahren die Stromerzeugung etwa verdreifacht und damit eine Wachstumsrate von 6% pro Jahr erreicht.



**Tabelle 1.1.** Zeitliche Entwicklung der elektrischen Energieerzeugung einzelner Länder

Land	Jährliche elektrische Energieerzeugung in TWh = 10 <sup>9</sup> kWh						EW in Mio.	CO <sub>2</sub> in t/EW
	1960	1970	1980	1990	2000	2008	2008	2006
China, VR	–	–	–	618	1313	1839(03)	1332	4,7
Deutschland <sup>a</sup>	108	218	347	566	575	637	82,1	8,9
Frankreich	72	139	247	419	505	576	62,3	6,2
Großbritannien	114	217	277	318	343	389	61,4	9,4
Italien	55	120	177	217	265	319	59,8	8,0
Polen	27	60	122	136	141	156	38,1	8,3
Schweden	35	67	94	142	138	150	9,2	5,6
Spanien	18	60	105	151	202	314	45,6	8,0
UdSSR <sup>b</sup>	≈300	≈700	1400?	1727?	860	914(03)	142,0	11,0
USA	780	1530	3100	3786	3982	3850(03)	394,1	19,3
Welt	≈2500	≈4900	≈10000	≈13000	≈14200	2003: ≈16660	≈6800 in 2009	4,4

<sup>a</sup> bis 1990 nur alte Bundesländer, 2000 neue und alte Bundesländer

<sup>b</sup> bis 1990 UdSSR, 2000: Russland, Russische Föderation

In Deutschland werden, ähnlich wie in anderen industrialisierten Ländern, etwa 46% der elektrischen Energie (Netto-Stromverbrauch) in der Industrie, 27% im Haushalt (davon nur ein kleiner Teil für die Beleuchtung, d. h. nur 8% der elektrischen Energie im Haushalt und damit nur 2% des ges. Verbrauchs), 14% in Handel und Gewerbe, 8,5% in öffentlichen Einrichtungen sowie etwa 1,5% in der Landwirtschaft und rund 3% im Verkehr einschließlich der Bahn verwendet. Der Anteil der in der Industrie eingesetzten elektrischen Energie ist in Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten stark zurückgegangen, einerseits bedingt durch Effizienzsteigerung bei der Anwendung und andererseits durch Abwanderung von Industriezweigen mit hohem elektrischen Energiebedarf in Länder mit günstigeren Strompreisen. Im Jahre 1952 betrug der Anteil der in der Industrie verbrauchten elektrischen Energie noch 75%.

Tabelle 1.2 gibt einen Überblick über den anteiligen Einsatz von Primärenergie zur Erzeugung elektrischer Energie in einigen ausgewählten Ländern. Bis heute werden etwa 65% der elektrischen Energie auf der Welt aus fossilen Brennstoffen erzeugt und der Rest etwa zu gleichen Teilen aus Kernbrennstoff (hauptsächlich Uran) und aus erneuerbaren Quellen, wobei die potentielle Energie des Wasser den weitaus größten Anteil liefert. Die langfristige Entwicklung wird durch die weiter stark zunehmende Weltbevölkerung auf acht oder sogar 10 Mrd. Menschen, durch die zu erwartende Verknappung des Erdöls und des Erdgases sowie durch die CO<sub>2</sub>-Emission beim Verbrennen fossiler Energieträger und die damit steigende Gefahr der globalen Erwärmung bestimmt werden. Als Forderungen aus dieser Bestandsaufnahme ergeben

**Tabelle 1.2.** Weltweite Erzeugung elektrischer Energie und Primärenergieträger im Jahre 1997

Land	Fossile Energie Kohle, Öl, Gas	Nuklear	Geo- ther- misch	Erneu- erbare Ener- gien <sup>a</sup>	Gesamt	Anteil	Ein- wohner
	Elektrische Energie $W_e$ in TWh = $10^9$ kWh				%	Millionen	
<b>Europa</b>	2443,1	1152,2	4,8	789,7	4389,0	31,1	
Deutschland	352,5	170,4	0,3	26,3	549,5	3,9	82,0
Frankreich	42,2	395,5	–	68,1	505,7	3,6	58,4
Großbritannien	241,1	98,1	–	6,1	345,3	2,5	58,8
Italien	200,9	–	3,9	46,7	251,5	1,8	57,2
Norwegen	0,7	–	–	110,9	116,6	0,8	4,5
Österreich	19,5	–	–	37,3	56,8	0,4	8,2
Polen	138,9	–	–	3,8	142,8	1,0	38,6
Schweden	9,7	70,2	–	68,8	148,7	1,1	8,9
Schweiz	2,2	25,4	–	35,2	62,7	0,4	7,1
Spanien	92,4	55,3	–	36,1	183,9	1,3	39,7
Russland	564,1	107,1	–	158,0	829,2	5,9	146,0
<b>Nordamerika</b>	2889,6	748,9	17,3	517,7	4371,5	31,0	–
Kanada	128,5	82,5	–	352,1	563,1	4,0	30,2
USA	2761,2	666,4	17,3	383,6	3808,4	27,0	273,7
<b>Südamerika</b>	291,6	21,6	6,4	531,4	851,0	6,0	–
<b>Afrika</b>	319,9	13,3	0,5	65,3	207,7	2,8	–
<b>Asien</b>	2878,6	457,7	11,9	514,4	3862,7	27,4	–
China VR	957,1	11,4	–	205,9	1174,4	8,3	1100,0
Indien	363,5	11,0	–	81,5	455,9	3,2	960,0
Japan	613,4	321,7	3,8	96,0	1034,9	7,3	125,9
<b>Ozeanien</b>	179,0	–	2,0	40,7	221,8	1,6	–
<b>Welt</b>	<b>9002,1</b>	<b>2392,7</b>	<b>42,8</b>	<b>2657,3</b>	<b>14094,9</b>	<b>100,0</b>	<b>5800</b>

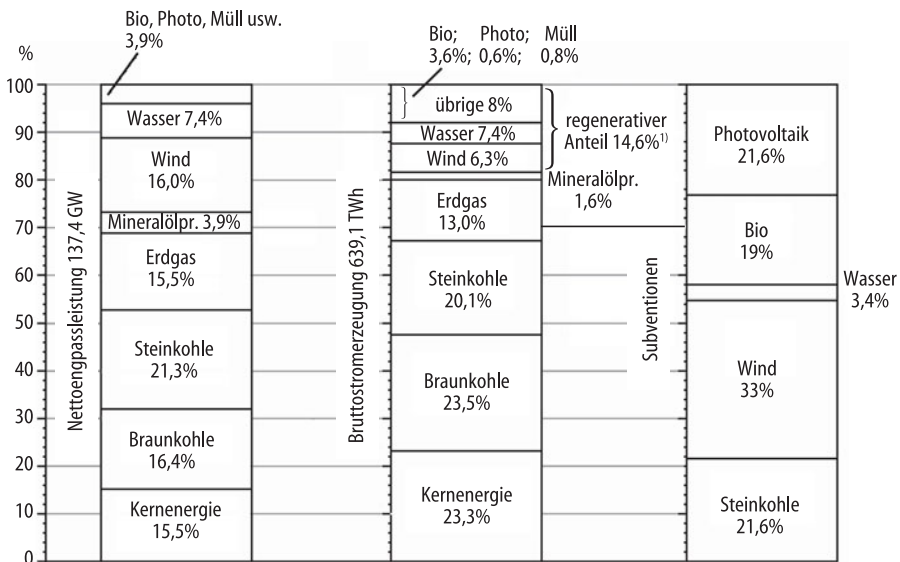
<sup>a</sup> Wasser, Wind, Gezeiten, Solar usw.

sich der äußerst sparsamer Umgang mit Energie (die aus Brüssel verordneten Energiesparlampen werden dazu wenig beitragen können), die Verbesserung des Umwandlungswirkungsgrades und, wie bereits oben gesagt, die weitere Entwicklung aller regenerativen (nicht fossilen) Energiequellen.

Die Elektrizitätswirtschaft in Deutschland und Europa hat in den letzten 10 Jahren durch die Liberalisierung des Strommarktes (nach einer EU-Richtlinie 1997 und dem Energiewirtschaftsgesetz von 1998 in Deutschland) und das Erneuerbare-Energien-Gesetz sowie das Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz einen starken Wandel durchgemacht. Von zuletzt 8 Verbundunternehmen in Deutschland, bei denen der größte Teil der Kraftwerksleistung und das 380-/220-kV-Verbundnetz konzentriert waren, sind nur vier geblieben, auch wenn viele regionale und lokale Erzeuger und Verteiler (etwa 1000 Unternehmen) weiter tätig sind. Die Anzahl der Beschäftigten ist im Zeitraum von 1992 bis 2007 um

etwa 85000 zurückgegangen, während sich der Umsatz etwa verdreifacht hat. Die abgegebene elektrische Arbeit an Endabnehmer stieg in diesem Zeitraum um etwa 25%, also nur um 1,5% pro Jahr. Die Durchschnittserlöse bei Abgabe an Tarifabnehmer sind 1999/2000 kurzfristig gefallen dann aber um etwa 4 Cent/kWh bis 2007 gestiegen gegenüber 1999 [1.37]. Die sogenannte Liberalisierung, die zu mehr Wettbewerb und geringeren Preisen führen sollte, ist gründlich gescheitert. Diese Entwicklung ist sehr kritisch zu sehen, zumal die unbedingt notwendigen Netzausbaumaßnahmen für die Aufnahme und Weiterleitung der Windenergie und deren Speicherung nur sehr schleppend anlaufen oder noch gar nicht in Angriff genommen wurden. Eine zuverlässige und langfristig gesicherte Wasser- und Elektrizitätsversorgung sowie auch der Eisenbahnverkehr gehören zu den originären Aufgaben des Staates und sollten deshalb in seinen Händen liegen oder zumindest so effektiv kontrolliert werden, dass Finanzjongleure keine Chance mehr zu Spekulationen haben.

Bild 1.3 vergleicht die elektrische Nettoengpassleistung der Kraftwerke in Deutschland aufgeteilt nach Primärenergiequellen und im Vergleich dazu die Bruttostromerzeugung. Auffallend ist, dass Kern- und Braunkohlekraftwerke in ihrer prozentual erzeugten Energie weit höher liegen als in ihrer prozentualen installierten Leistung. Bei Windkraftwerken trifft das Gegenteil zu: die installierte Leistung liegt bei 16% während nur 6,3% der Erzeugung auf die Windkraftwerke entfallen. Die rechte Säule im Bild 1.3 gibt einen groben



1) Nach [1.37] beträgt der Anteil der erneuerbaren Energie am gesamten Bruttostromverbrauch 14,8% im Jahre 2008. Durch erneuerbare Energien vermiedene Emissionen rd. 112 Mio t CO<sub>2</sub> im Jahre 2008.

**Bild 1.3.** Nettoengpassleistung 2007, Bruttostromerzeugung 2008 und Subventionen in Deutschland

**Tabelle 1.3.** Entwicklung erneuerbare Energien (EE) zur Stromerzeugung 2000 bis 2008 und Prognosen für 2020 und 2030 in Deutschland [1.37], [1.39]

Jahr		2000	2007	2008	2020	2030
Wasserkraft	TWh	24,9	21,7	20,4	24,3	24,6
Wind (Land und See)		7,6	39,7	40,6 <sup>a)</sup>	87,2	142,2
Photovoltaik		<0,1	3,1	4,0	15,5	21,9
Biomasse		4,7	23,5	27,8	46,2	51,4
Erdwärme		0	0	0,02	1,8	6,0
EE-Energie gesamt	TWh	37,2	87,6	93,3 <sup>b)</sup>	178,2	282,1
Anteil am Bruttostromverbrauch	%	6,4	14,2	15,2	?	?

a) 20894 Windkraftwerke in Deutschland mit einer installierten Leistung von zusammen  $P_r = 23894$  MW und einer Vollaststundenzahl von  $T_a = W_{el}/P_r = 40\,547\,000$  MWh/23894 MW = 1695 h.

b) Im Jahre 2008 trugen die erneuerbaren Energien 15,2 % zur Gesamtstromerzeugung bei. Dieser Anteil ist bis zum Jahr 2014 auf 25,8% gestiegen.

Überblick über die Verteilung der Subventionen. Das prozentuale Missverhältnis fällt besonders bei Photovoltaik und Bio ins Auge.

Eine Verbesserung der jährlichen Vollaststundenzahl, die im Jahre 2008 für die Windkraftwerke bei etwa 1695 Stunden (von 8760 Stunden pro Jahr) lag, erhofft man sich durch den im Jahre 2009 begonnenen Bau von Offshore-Windkraftanlagen insbesondere in der Nordsee.

Tabelle 1.3 zeigt einen Überblick über die Entwicklung der erneuerbaren Energien (EE) zur Stromerzeugung in Deutschland, wobei der Schwerpunkt bei den Windkraftwerken und der Biomasse liegt. Im Jahre 2008 trugen die erneuerbaren Energien mit  $40,5$  TWh =  $40,5 \cdot 10^9$  kWh etwa 14,3 % bis 14,8 % (unterschiedliche Quellen und Berechnungsmethoden) zur gesamten Stromerzeugung bei.

Die installierte Leistung von Windkraftwerken liegt in Europa bei 65000 MW (in Deutschland etwa 37% davon) und in der Welt bei etwa 120000 MW.

Die ehrgeizigen Pläne der deutschen Bundesregierung die elektrische Energieerzeugung im Jahre 2050 zu 80% aus erneuerbaren Energiequellen zu decken, wobei der Wind den größten Teil beisteuern soll, sind nur realisierbar, wenn man sehr große Speicherkapazitäten bereitstellt und auch das Hochspannungsnetz entsprechend ausbaut.

## 1.2

### Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie

Die zur öffentlichen Versorgung und zur industriellen Einspeisung benötigte elektrische Energie wird bis heute weitgehend aus Dampfkraftwerken (fossil

oder nuklear erzeugter Dampf) oder aus Wasserkraftwerken bereitgestellt. Der Anteil der Windkraftwerke und der Solarkraftwerke ebenso wie die geothermischen Kraftwerke (Tabelle 1.2) an der Bereitstellung der elektrischen Energie ist gegenwärtig weltweit noch gering, auch wenn in einzelnen Ländern wie z. B. in Dänemark, Deutschland, Schweden und USA starke Anstrengungen unternommen werden, diesen Anteil regenerativer Energieerzeugung zu erhöhen (s. a. Abschnitt 4.5).

Die Bereitstellung elektrischer Energie erfolgt in der Regel mit Dreileiter-Drehstrom 50 Hz oder 60 Hz. Das Drehstromsystem wurde weltweit Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts eingeführt, insbesondere nach der erfolgreichen ersten Drehstrom-Fernübertragung über eine Strecke von 175 km vom Wasserkraftwerk Lauffen am Neckar nach Frankfurt am Main zur elektrotechnischen Ausstellung im Jahre 1891. Initiator und Organisator der Ausstellung war Oskar von Miller unter dessen Leitung gerade das Wasserkraftwerk Lauffen entstand (noch mit 40 Hz). An dem Großexperiment waren besonders auch Charles E. Brown, damals Chefelektriker der MFO bei Zürich und später Mitbegründer der Brown Boveri & Cie BBC, und Michael von Dolivo-Dobrowolsky, Chefelektiker der Allgemeinen Elektrizitäts-Gesellschaft AEG in Berlin, beteiligt. Der eine als der Erbauer des Lauffener Generators mit 210 kW und der andere, der Oskar von Miller überzeugte für die Übertragung Drehstrom anstatt Wechselstrom zu wählen und der auch Verantwortung trug für den 100-PS-Drehstrom-Asynchronmotor zum Antrieb der Pumpe für den Wasserfall auf dem Ausstellungsgelände [1.3, 1.4, 1.8, 1.34].

Andere Stromarten als Drehstrom 50 Hz oder 60 Hz werden nur in Sonderfällen angewendet, so Gleichstrom für Straßen- und Schnellbahnen, für chemische Prozesse und bei der Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (Kapitel 19) sowie Wechselstrom mit  $16\frac{2}{3}$  für elektrische Vollbahnen in Mitteleuropa mit einem ausgedehnten eigenen Wechselstromnetz 110 kV und einer teilweisen Erzeugung der elektrischen Energie in Wechselstromgeneratoren. Daneben wurde in einigen Ländern Wechselstrom mit 50 Hz für die Bahnstromversorgung eingeführt (z. B. Frankreich, Spanien, Russland).

Kraftwerke in der Industrie mit Generatoren, die direkt in das Mittelspannungs- oder das Niederspannungs-Industriernetz einspeisen kommen in einigen Industriezweigen vor, wenn beim Fabrikationsprozess auch Dampf benötigt wird (z. B. Zucker- und Papierfabriken). Die Bemessungsspannung dieser Generatoren wird 5% höher als die Netzennennspannung gewählt. Auch bei der Kraft-Wärme-Kopplung kommen kleinere Generatoren zum Einsatz, vornehmlich in Städten, um so den fossilen Brennstoff hoch auszunutzen.

Durch den Zusammenschluß der einzelnen Teilnetze aus den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts zum Deutschen Verbundnetz und nach dem zweiten Weltkrieg dann zum Europäischen Verbundnetz (Kapitel 12) wurde es möglich, immer größere Kraftwerksblöcke an das Netz anzuschließen (Bilder 1.5 und 5.2). Man erreichte damit eine Absenkung der spezifischen Erzeugungskosten und eine Verbesserung des Wirkungsgrades (Kapitel 3). Erst

durch den Verbundbetrieb gelang es, die Bereitstellung der Kraftwerksreserve wirtschaftlich tragbar zu machen und damit eine zuverlässige Versorgung mit elektrischer Energie aufzubauen [1.5, 1.12, 1.27, 1.28, 1.30].

Die vielen Einzelverbraucher am Verbundnetz entnehmen elektrische Leistung und Energie nach eigenen Bedürfnissen und demzufolge nicht zeitgleich. Dabei werden kleinere Verbraucher (Haushalte, Beleuchtung usw.) an das Niederspannungsnetz und größere Verbraucher (Industrie) an das Mittelspannungsnetz (10 kV oder 20 kV) und in besonderen Fällen sogar an das Hochspannungsnetz (110 kV und darüber) angeschlossen. Die einzelnen Verbraucherleistungen addieren sich im Laufe eines Tages zu einer Tagesbelastungskurve. Bild 1.4 zeigt dafür als Beispiel die Tagesbelastungskurve für einen Wintertag in Deutschland und die zur Deckung herangezogenen Kraftwerke, die man in Kraftwerke zur Deckung der Grundlast (etwa 50%), zur Deckung der Mittellast und zur Deckung der Spitzenlast einteilt.

Außer den im Bild 1.4 genannten Speicher- und Pumpspeicher-Kraftwerken werden auch Gasturbinenkraftwerke zur Deckung der Spitzenlast eingesetzt und darüber hinaus auch zur schnell zu aktivierenden Reserve, so dass die Gasturbinenkraftwerke häufig nur eine sehr geringe Einsatzdauer im Jahr aufweisen, im Gegensatz zu den Grundlastkraftwerken deren jährliche Einsatzdauer (Vollaststundenzahl) bei etwa 7000 h/a liegen kann. Die Überlagerung aller Tagesbelastungskurven eines Jahres führt zur Jahresbelastungskurve, die nach der Höhe der Belastung geordnet zur geordneten Jahresbelastungskurve wird und so einen Hinweis liefert für den Einsatz unterschiedlicher

**Bild 1.4.** Tagesbelastungskurve Deutschland (schematisch) an einem typischen Wintertag im Jahre 2000 mit Kraftwerkseinsatz nach Primärenergie zur Deckung der Grund-, Mittel- und Spitzenlast

