

Wilfried Knies  
Klaus Schierack  
Manfred Berger



# Elektrische Anlagentechnik

Kraftwerke, Netze, Schaltanlagen,  
Schutzeinrichtungen



8., aktualisierte Auflage

HANSER





#### **Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!**

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial. Geben Sie dazu einfach diesen Code ein:

**plus-5uf7m-4kfwk**

**[plus.hanser-fachbuch.de](http://plus.hanser-fachbuch.de)**



#### **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](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**

# **Lernbücher der Technik**

herausgegeben von Dipl.-Gewerbelehrer Manfred Mettke,  
Oberstudiendirektor a. D.

Bisher liegen vor:

Bauckholt, Grundlagen und Bauelemente der Elektrotechnik

Felderhoff/Busch, Leistungselektronik

Hofmann/Spindler, Werkstoffe in der Elektrotechnik

Freyer, Nachrichten-Übertragungstechnik

Heiderich/Meyer, Technische Probleme lösen mit C/C++

Knies/Schierack/Berger, Elektrische Anlagentechnik

Schaaf/Böcker, Mikrocomputertechnik

Seidel/Hahn, Werkstofftechnik

Wilfried Knies  
Klaus Schierack  
Manfred Berger

# Elektrische Anlagentechnik

Kraftwerke, Netze, Schaltanlagen, Schutzeinrichtungen

8., aktualisierte Auflage

HANSER

**Autoren:**

Dipl.-Ing. (FH) Oberstudienrat a. D. Wilfried Knies

Dipl.-Ing. Studiendirektor a.D. Klaus Schierack

**Bearbeiter:**

Dipl.-Ing. Dr. techn. Manfred Berger, HTBLuVA St. Pölten



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. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen 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, sind 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.

© 2023 Carl Hanser Verlag München

Internet: [www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Frank Katzenmayer

Herstellung: Frauke Schafft

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Titelbild: © [stock.adobe.com/Comofoto](http://stock.adobe.com/Comofoto)

Satz: Manfred Berger

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-47715-5

E-Book-ISBN 978-3-446-47836-7

# Vorwort des Herausgebers

## Was können Sie mit diesem Buch lernen?

Wenn Sie dieses Lehrbuch durcharbeiten, dann erhalten Sie umfassende Qualifikationen, die Sie zur Handlungsfähigkeit im Bereich der elektrischen Anlagentechnik führen. Der Umfang dessen, was wir Ihnen anbieten, orientiert sich an

- den Studienplänen der Fachhochschulen für Technik,
- den Lehrplänen der höheren technischen und gewerblichen Lehranstalten,
- den Lehrplänen der Fachschulen für Technik in den Bundesländern,
- den Anforderungen der beruflichen Praxis,
- dem Stand der Technik.

Sie werden systematisch mit der Struktur, dem Aufbau, dem Verhalten, dem Schutz, der Berechnung und Projektierung von Kraftwerken, Netzen und Schaltanlagen vertraut gemacht. Jeder Problemkreis ist dabei praxisgerecht aufgearbeitet. Das heißt, Sie gehen stets folgenden Fragen nach:

- Welche schaltungstechnische und/oder technische Problemlösung liegt vor?
- Welche Gesetzmäßigkeiten gibt es zu hinterfragen?
- Welche Funktionsprinzipien werden wirksam?
- Welche Arbeitsmethoden und Arbeitsmittel müssen eingesetzt werden?
- Wo liegen die Anwendungsmöglichkeiten und ihre Grenzen?

## Wer kann mit diesem Buch lernen?

Jeder, der

- sich weiterbilden möchte,
- die Grundlagen der Mathematik beherrscht und
- Kenntnisse über Grundlagen der Elektrotechnik besitzt.

Das können sein:

- Studenten an Fachhochschulen und Berufsakademien,
- Schüler an höheren technischen und gewerblichen Lehranstalten,
- Schüler an Fachschulen für Technik,

- Schüler an beruflichen Gymnasien, Berufsoberschulen und Berufsfachschulen,
- Facharbeiter, Gesellen und Meister, während und nach der Ausbildung,
- Umschüler und Rehabilitanden,
- Teilnehmer an Fort- und Weiterbildungskursen,
- Autodidakten,

vor allem im Fachbereich Elektrotechnik.

## Wie können Sie mit diesem Buch lernen?

Ganz gleich, ob Sie mit diesem Buch in Schule, Betrieb, Lehrgang oder zu Hause im „stillen Kämmerlein“ lernen, es wird Ihnen letztlich Freude machen.

*Warum?*

Ganz einfach, weil Ihnen hier ein Buch vorgelegt wird, das in seiner Gestaltung die Gesetze des menschlichen Lernens beachtet. Deshalb werden Sie in jedem Kapitel zuerst mit dem bekannt gemacht, was Sie am Ende können sollen, nämlich mit den Lernzielen.

*– Ein Lernbuch also! –*

Danach beginnen Sie sich mit dem Lerninhalt, dem Lehrstoff, auseinanderzusetzen: schrittweise aufgebaut, ausführlich beschrieben und umgesetzt in die technisch-wissenschaftliche Darstellung. Zur Vertiefung stellen Ihnen die Autoren Beispiele vor.

*– Ein unterrichtsbegleitendes Lehrbuch. –*

Jetzt können und sollten Sie sofort die Übungsaufgaben durcharbeiten, um das Gelernte zu festigen. Der wesentliche Lösungsgang und das Ergebnis der Übungen stehen auf *plus.hanser-fachbuch.de* für Sie zur Verfügung.

*– Also auch ein Arbeitsbuch mit Lösungen. –*

Sie wollen sicher sein, dass Sie richtig und vollständig gelernt haben. Deshalb bieten Ihnen die Autoren zur Lernerfolgskontrolle lernzielorientierte Tests an. Ob Sie richtig geantwortet haben, können Sie aus den Lösungen *plus.hanser-fachbuch.de* ersehen.

*– Lernzielorientierte Tests mit Lösungen. –*

Trotz intensiven Lernens durch Beispiele, Übungen und Bestätigung des Gelernten im Test, als erste Wiederholung, verliert sich ein Teil des Wissens und Könnens wieder. Wenn Sie nicht bereit sind, regelmäßig und bei Bedarf zu wiederholen!

*– Schließlich noch ein Repetitorium! –*

Für das Aufsuchen entsprechender Kapitel verwenden Sie das Inhaltsverzeichnis am Anfang des Buches, für die Suche bestimmter Begriffe steht das Stichwortverzeichnis am Ende des Buches zur Verfügung.

*– Selbstverständlich mit Inhalts- und Stichwortverzeichnis. –*

Sicherlich werden Sie durch intensives Arbeiten mit diesem Buch Ihre „Bemerkungen zur Sache“ unterbringen und es so zu Ihrem individuellen Arbeitsmittel ausweiten.

*– Am Ende ist Ihr Buch entstanden.*

Möglich wurde dieses Lernbuch für Sie durch die Bereitschaft der Autoren und die intensive Unterstützung des Verlages mit seinen Mitarbeitern. Ihnen sollten wir herzlich danken. Beim Lernen wünsche ich Ihnen viel Freude und Erfolg!

Ihr Herausgeber

*Manfred Mettke*

# Vorwort der Autoren

In der elektrischen Anlagentechnik vollzieht sich ebenso wie auf anderen Gebieten der Elektrotechnik eine rasche Entwicklung. Versorgungszuverlässigkeit und Sicherheit erlangen immer größere Bedeutung und beeinflussen die Methoden und Verfahren für das Berechnen, Bemessen und Bewerten von Anlagen. Dies findet seinen Niederschlag in den Normen, die größtenteils einer ständigen Überarbeitung bzw. Neufassung unterliegen.

Wenn auch der Rahmen durch die Norm vorgegeben ist, so sind die Projektierung, der Bau und der Betrieb von Anlagen der elektrischen Energietechnik ohne die Kenntnis der physikalischen Zusammenhänge und der mathematischen Lösungsmethoden nicht denkbar. Dazu gehört das Wissen um die Aufgaben und Funktionsweisen der verschiedenen Schalt- und Überwachungselemente sowie die Fähigkeit der Interpretation technischer Dokumentationen.

Die Technik elektrischer Anlagen zur Erzeugung, Übertragung und Verteilung der elektrischen Energie durchsetzt viele angrenzende Fachgebiete. Das vorliegende Buch will in diese Technik einführen und insbesondere Problemlösungen für Niederspannungs- und Mittelspannungsanlagen vorstellen. Auf ergänzende Themen, wie z. B. der Selektivschutz in Mittel- und Hochspannungsnetzen oder die Prüfung der Schutzmaßnahmen, wird zugunsten einer thematischen Eingrenzung nicht eingegangen.

Die Autoren ließen sich von dem Gedanken leiten, den Lernenden ein Werk anzubieten, das sowohl den Aufbau und die Wirkungsweise der Anlagenelemente (Betriebsmittel) vorstellt als auch Anleitung und Hilfestellung für die selbständige Projektierung elektrischer Anlagen gibt. Ein Großteil des Buches ist daher auch der Berechnung gewidmet. Alle wichtigen Grundgleichungen sind abgeleitet, wobei auf die Differential- und Integralrechnung verzichtet wird. Alle Problemstellungen und Lösungsansätze orientieren sich an den Forderungen, die sich aus der Anlagenprojektierung ergeben. An zahlreichen praktischen Beispielen wird der Lernende sowohl mit den theoretischen Zusammenhängen und physikalischen Grundlagen vertraut gemacht als auch zu einer einsichtigen Anwendung der Regeln der Technik geführt.

Ein großes Angebot an Übungsbeispielen und zusammenfassenden Tests fordern den Lernenden permanent zur aktiven Überprüfung seines Wissens auf. Die tätige Auseinandersetzung mit dem Lernstoff trägt dazu bei, dass die Lernziele und die angestrebte Handlungsfähigkeit erreicht werden.

Durch die Vielzahl der Hinweise auf die Normen sowie durch zahlreiche Diagramme und Tabellen eignet sich das Buch auch als technisches Handbuch für den in der Praxis stehenden Techniker.

*Wilfried Knies und Klaus Schierack*

## Vorwort zur siebten Auflage

Zuerst möchte ich den Autoren Wilfried Knies und Klaus Schierack besten Dank für die Erstellung und laufende Bearbeitung des Buches aussprechen. Ich selbst habe nun die Überarbeitung zur siebten Auflage übernommen.

Seit Erscheinen der sechsten Auflage haben sich sowohl im Bereich der Normen als auch in der Elektrizitätswirtschaft selbst viele Änderungen ergeben. Daher wurden die Verweise auf die Normen auf den aktuellen Stand gebracht. Zusätzlich sind jetzt auch die österreichischen und teilweise auch die europäischen Normen angeführt. Im Anhang befindet sich eine tabellarische Gegenüberstellung der österreichischen (ÖVE/ÖNORM), der deutschen (DIN VDE) und der europäischen EN-Normen. Dem derzeitigen Umbruch in der Elektrizitätswirtschaft, der großangelegten Neuausrichtung der Erzeugungsstruktur wurde durch entsprechende Ergänzungen Rechnung getragen.

Das Layout des Buches wurde an das aktuelle Hanser-Layout angepasst. Für Hervorhebungen werden Textboxen folgender Art verwendet:



Angabe der Lernziele



Rechenbeispiele, im Textteil durchgerechnet



Übungsbeispiele: Angabe im Textteil, Lösung auf [plus.hanser-fachbuch.de](https://plus.hanser-fachbuch.de)



Definitionen, Regeln und Hervorhebungen

Die Lösungsteile der Übungsbeispiele und Lernzielfragen sind nun auf [plus.hanser-fachbuch.de](https://plus.hanser-fachbuch.de) ausgelagert. In den Abbildungen wurden Schaltungssymbole und Bezeichnungen aktualisiert. Das Literaturverzeichnis wurde aktualisiert und ergänzt.

Ich bedanke mich bei allen für die zahlreichen Anregungen und Verbesserungsvorschläge und hoffe, dass ich auch in Zukunft für eine gelungene Weiterentwicklung des Buches zahlreiche Anregungen erhalte.

St. Pölten, Januar 2021

*Manfred Berger*

## Vorwort zur achten Auflage

Bei dieser Auflage wurden Fehler, die bei der Erstellung der siebten Auflage entstanden sind, ausgebessert.

St. Pölten, April 2023

*Manfred Berger*

Hinweis zu den auszugsweise verwendeten Normeninhalten:

OVE-Normenauszüge im Buch erfolgen mit freundlicher Genehmigung durch den Österreichischen Verband für Elektrotechnik.

Auszüge aus DIN-Normen mit VDE-Klassifikation sind für die angemeldete limitierte Auflage wiedergegeben mit Genehmigung 62.023 des DIN Deutsches Institut für Normung e.V. und des VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. Für weitere Wiedergaben oder Auflagen ist eine gesonderte Genehmigung erforderlich.

Maßgebend für das Anwenden der DIN-VDE und OVE-Normen sind deren Fassungen mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der VDE VERLAG GmbH, Bismarckstr. 33, D-10625 Berlin, [www.vde-verlag.de](http://www.vde-verlag.de), bzw. bei Austrian Standards International, Heinestraße 38, A-1020 Wien, [www.austrian-standards.at](http://www.austrian-standards.at), erhältlich sind.

Die Autoren danken der Internationalen Elektrotechnischen Kommission (IEC) für die Erlaubnis zur Reproduktion von Daten der IEC-Normen. Alle derartigen Auszüge unterliegen dem Urheberrecht der IEC, Genf, Schweiz. Alle Rechte sind vorbehalten. Weitere Informationen zur IEC finden Sie unter [www.iec.ch](http://www.iec.ch). IEC hat keine Verantwortung für die korrekte Reproduktion der Normeninhalte durch die Autoren. Weiters ist IEC in keiner Weise für den weiteren Inhalt des Buches verantwortlich.

DIN-Normen ohne VDE-Klassifikation sind mit Erlaubnis von DIN Deutsches Institut für Normung e.V. wiedergegeben. Maßgebend für das Anwenden der DIN-Normen sind deren Fassungen mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Am DIN Platz, Burggrafenstraße 6, D-10787 Berlin, [www.beuth.de](http://www.beuth.de), erhältlich sind.



# Inhalt

<b>1</b>	<b>Übersicht über die elektrische Anlagentechnik .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Kraftwerke .....</b>	<b>3</b>
2.1	Energieformen .....	3
2.2	Wärme­kraftwerke .....	4
2.2.1	Allgemeines .....	4
2.2.2	Arbeitsprozess der Dampfkraftanlage .....	5
2.2.3	Fossil befeuerte Kraftwerke .....	11
2.2.4	Kernkraftwerke .....	28
2.3	Kraftwerke regenerativer Energiequellen .....	32
2.3.1	Allgemeines .....	32
2.3.2	Wasserkraftwerke .....	33
2.3.3	Windkraftwerke .....	39
2.3.4	Photovoltaische Kraftwerke .....	41
2.4	Kraftwerkseinsatz .....	45
2.4.1	Allgemeines .....	45
2.4.2	Netzbelastung .....	45
2.4.3	Einsatzplanung .....	45
2.5	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 2 .....	48
<b>3</b>	<b>Netze .....</b>	<b>51</b>
3.1	Aufbau von Netzen .....	51
3.1.1	Allgemeines .....	51
3.1.2	Netzspannungen .....	53
3.1.3	Netzstrukturen .....	54
3.1.4	Netz-Verteilungssysteme .....	59
3.1.5	Freileitungen .....	61

3.1.6	Starkstromkabel .....	67
3.1.7	Lernzielorientierter Test zu Abschnitt 3.1 .....	77
3.2	Bemessung elektrischer Leitungen .....	79
3.2.1	Gesichtspunkte der Projektierung .....	79
3.2.2	Kenngrößen elektrischer Leitungen .....	83
3.2.3	Messung der Leitungskonstanten .....	93
3.2.4	Lernzielorientierter Test zu Abschnitt 3.2 .....	95
3.3	Spannungsänderung und Verlustleistung .....	96
3.3.1	Allgemeines .....	96
3.3.2	Leitung am Ende belastet .....	97
3.3.3	Leitung mehrfach belastet .....	106
3.3.4	Ringleitung mehrfach belastet .....	113
3.3.5	Fernleitungen .....	119
3.3.6	Lernzielorientierter Test zu Abschnitt 3.3 .....	128
3.4	Kurzschlüsse in Netzen .....	130
3.4.1	Allgemeines .....	130
3.4.2	Elektrische Einschaltvorgänge .....	131
3.4.3	Kurzschlussstromverlauf und Kenngrößen .....	134
3.4.4	Kurzschlussarten .....	142
3.4.5	Lernzielorientierter Test zu Abschnitt 3.4 .....	144
3.5	Berechnung von Kurzschlussströmen .....	145
3.5.1	Allgemeines .....	145
3.5.2	Symmetrische Komponenten .....	146
3.5.3	Impedanzen .....	153
3.5.4	Dreipoliger Kurzschluss .....	168
3.5.5	Zweipoliger Kurzschluss .....	175
3.5.6	Einpoliger Kurzschluss (Erdkurzschluss) .....	176
3.5.7	Lernzielorientierter Test zu Abschnitt 3.5 .....	183
<b>4</b>	<b>Schaltanlagen .....</b>	<b>185</b>
4.1	Allgemeines .....	185
4.2	Schaltgeräte .....	187
4.2.1	Aufgaben und Anforderungen .....	187
4.2.2	Einteilung der Schaltgeräte .....	189
4.3	Elektrische und mechanische Vorgänge beim Schalten .....	190
4.3.1	Einschaltvorgänge .....	191
4.3.2	Ausschaltvorgänge .....	194
4.3.3	Mechanische Vorgänge beim Einschalten .....	195

4.4	Schaltlichtbogen .....	196
4.4.1	Ausschalten von Gleichstrom .....	199
4.4.2	Ausschalten von Wechselstrom .....	201
4.5	Lichtbogenlöscheinrichtungen .....	204
4.6	Niederspannungsschaltgeräte .....	209
4.6.1	Sicherungen (Schmelzsicherungen) .....	209
4.6.2	Leitungsschutzschalter (LS-Schalter) .....	219
4.6.3	Leistungsschalter .....	224
4.6.4	Auswahlkriterien .....	230
4.7	Bauarten von NS-Schaltanlagen .....	236
4.8	Projektierung von NS-Schaltanlagen .....	239
4.9	Mittelspannungs- und Hochspannungsschaltgeräte .....	245
4.9.1	Einsatz und Auswahl .....	245
4.9.2	Belastung durch Schaltüberspannungen .....	249
4.10	Bauarten von Mittelspannungs- und Hochspannungsschaltanlagen .....	255
4.10.1	Innenraumschaltanlagen .....	255
4.10.2	Freiluftschaltanlagen .....	256
4.11	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 4 .....	258
<b>5</b>	<b>Netzschutz .....</b>	<b>261</b>
5.1	Allgemeines .....	261
5.2	Schutz von Leitungen gegen zu hohe Erwärmung .....	262
5.2.1	Strombelastbarkeit .....	262
5.2.2	Bemessung nach der Strombelastbarkeit .....	267
5.2.3	Erwärmungsvorgang .....	271
5.2.4	Schutz bei Überlast .....	277
5.2.5	Thermische Beanspruchung bei Kurzschluss .....	280
5.2.6	Belastbarkeit im Kurzschlussfall .....	281
5.2.7	Schutz bei Kurzschluss .....	286
5.2.8	Lernzielorientierter Test zu Abschnitt 5.2 .....	298
5.3	Selektivität in Niederspannungsnetzen .....	299
5.3.1	Allgemeines .....	299
5.3.2	Schmelzsicherung – Schmelzsicherung .....	301
5.3.3	Leistungsschalter – Leistungsschalter .....	306
5.3.4	Leistungsschalter – Schmelzsicherung .....	311
5.3.5	HH-Sicherung – NS-Leistungsschalter .....	313
5.3.6	Lernzielorientierter Test zu Abschnitt 5.3 .....	317

<b>6</b>	<b>Personenschutz</b> .....	<b>321</b>
6.1	Allgemeines.....	321
6.2	Gefährdung des Menschen.....	324
6.2.1	Wirkungen des elektrischen Stromes.....	324
6.2.2	Einfluss der Frequenz, Stromstärke und Einwirkungszeit.....	325
6.2.3	Impedanz des menschlichen Körpers.....	326
6.3	Fehlerstromkreise.....	328
6.3.1	Fehlerstromkreis im ungeerdeten Netz.....	328
6.3.2	IT-Netzsystem.....	332
6.3.3	TT-Netzsystem.....	338
6.3.4	TN-Netzsystem.....	342
6.4	Erdungsanlagen.....	348
6.5	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 6.....	356
<b>7</b>	<b>Kompensationsanlagen</b> .....	<b>359</b>
7.1	Allgemeines.....	359
7.2	Kompensation bei sinusförmigen Strömen.....	361
7.2.1	Einzelkompensation.....	364
7.2.2	Gruppenkompensation.....	369
7.2.3	Zentralkompensation.....	370
7.3	Kompensation in Netzen mit Stromrichtern.....	371
7.3.1	Allgemeines.....	371
7.3.2	Ermittlung der Resonanzfähigkeit von Netzen.....	374
7.3.3	Maßnahmen zur Begrenzung von Netzurückwirkungen.....	376
7.3.4	Beeinflussung von Tonfrequenz-Rundsteueranlagen.....	378
7.4	Lernzielorientierter Test zu Kapitel 7.....	379
	<b>Bildquellennachweis</b> .....	<b>381</b>
	<b>Literatur</b> .....	<b>383</b>
	<b>Normen</b> .....	<b>385</b>
	<b>Stichwortverzeichnis</b> .....	<b>389</b>

# 1

## Übersicht über die elektrische Anlagentechnik

Die stark wachsende Elektrifizierung auf allen Gebieten des täglichen Lebens führte in den letzten Jahrzehnten zu einer Steigerung und Konzentration der installierten elektrischen Leistungen in Industrie, Gewerbe, öffentlichen Gebäuden und Hausinstallationen. Die technische Disziplin, die sich mit den Methoden der Gestaltung, Berechnung, Installation und Überwachung von Anlagen der elektrischen Energieversorgung und Energienutzung befasst, ist die elektrische Anlagentechnik.



Elektrische Anlagen sind Anlagen zur Erzeugung, Übertragung, Verteilung, Umwandlung, Speicherung und Nutzung der elektrischen Energie.

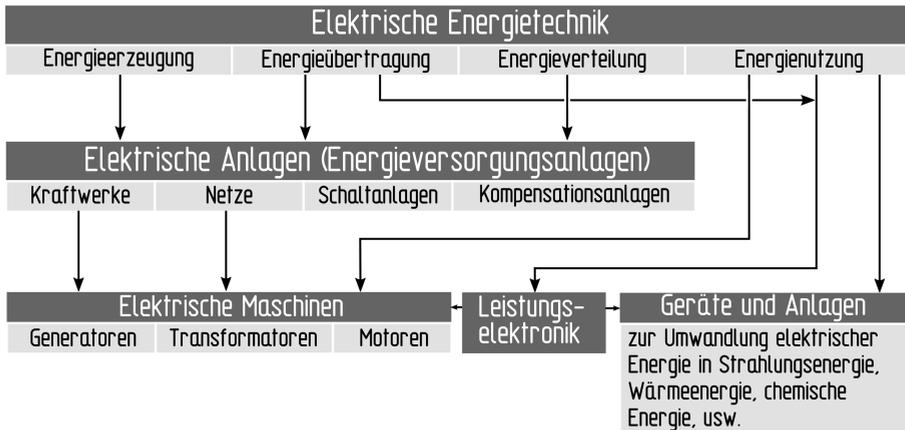
Gelegentlich wird für elektrische Anlagen noch der klassische Begriff „Starkstromanlagen“ verwendet. Die umfassende Aufgabenstellung der elektrischen Anlagentechnik erfordert eingehende Kenntnisse:

- der Bedingungen, unter denen die Energieversorgung bzw. -nutzung erfolgen,
- der elektrischen Betriebsmittel als Teil der elektrischen Anlage,
- des Aufbaus des gesamten Anlagensystems und dessen Verhalten bei den verschiedenen Betriebsbedingungen im ungestörten und gestörten Betrieb.

Durch die hohe Bedeutung, die die elektrische Energie hat, werden besondere Anforderungen an die Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit der elektrischen Anlagen gestellt. Deshalb muss die elektrische Anlagentechnik stets um technische Lösungen bemüht sein, die geringste Anlagen- und Betriebskosten bei größter Versorgungssicherheit und größtmöglicher Schonung der Energiereserven und der Umwelt garantieren. Die elektrische Anlagentechnik muss sicherstellen, dass:

- die Abnehmer in ausreichender Menge mit elektrischer Energie versorgt werden,
- die elektrische Energie jederzeit mit den vereinbarten Kennwerten zur Verfügung steht,
- im Störfall nur der gestörte Netzteil von der Energieversorgung abgetrennt wird,
- die Nutzung der elektrischen Energie bei sachgemäßer Handhabung ungefährlich ist,
- die elektrischen Anlagen mit dem bestmöglichen Wirkungsgrad geplant werden,
- die notwendigen Anlagen eine möglichst geringe Belastung der Umwelt hervorrufen.

Bild 1.1 zeigt die Anwendungsgebiete der elektrischen Anlagentechnik innerhalb der elektrischen Energietechnik.



**Bild 1.1** Übersicht über die elektrische Anlagentechnik

Den Schwerpunkt bilden die Anlagen zur elektrischen Energieversorgung. Anlagen zur elektrischen Energieversorgung sind:

- die elektrischen Einrichtungen der Kraftwerke,
- die Netze mit ihren Schutzeinrichtungen, Kabeln, Leitungen und Erdungsanlagen,
- die Schaltanlagen mit den verschiedenen Schaltgeräten.

Die Übertragung der elektrischen Energie erfolgt aus wirtschaftlichen Gründen auf verschiedenen Spannungsebenen. Dadurch sind die entsprechenden Anlagen sehr unterschiedlichen Beanspruchungen ausgesetzt. Mit den Problemen der Hoch- und Höchstspannungsanlagen und ihren technischen Lösungen beschäftigt sich die Hochspannungstechnik. Mit den Nieder- und Mittelspannungsanlagen setzt sich das vorliegende Buch auseinander. In diesem Rahmen werden auch Betriebsmittel und Anlagensysteme der Hochspannungstechnik vorgestellt, wenn Unterschiede oder Besonderheiten herausgestellt werden sollen.

Viele Aufgaben sind für die elektrische Anlagentechnik nur im Verbund mit anderen Fachgebieten zu lösen. So ergeben sich Schnittstellen:

- mit der Kraftwerkstechnik bei den Anlagen zur elektrischen Energieerzeugung,
- mit der Hochspannungstechnik bei den Hoch- und Höchstspannungsanlagen,
- mit der Elektrizitätswirtschaft bei der Überwachung und Führung des Energieflusses und der damit zusammenhängenden Ansteuerung der Schaltanlagen.

Die nahtlosen Übergänge an den Schnittstellen müssen durch sinnvolle Abgrenzung der Anlagen und eindeutige Abstimmung der technischen Daten erreicht werden. Zur elektrischen Anlagentechnik gehören deshalb auch entsprechende Grundkenntnisse aus den angrenzenden Fachgebieten.

# 2

## Kraftwerke



### Lernziele

Nach Durcharbeitung dieses Kapitels können Sie

- die verschiedenen Energieformen erläutern,
- den Energieumwandlungsprozess und das Wärmeschaltbild eines Wärmekraftwerks erklären,
- die Arbeitsweise der Anlagenteile eines Kohlekraftwerkes beschreiben,
- die Maßnahmen zur Minderung der Umweltbelastung bei Kohlekraftwerken erläutern,
- die bei Wärmekraftwerken erreichbaren Wirkungsgrade begründen,
- den Aufbau der elektrischen Anlage eines Kraftwerksblockes beschreiben,
- die Arbeitsweise und Sicherheitsmaßnahmen eines Kernkraftwerkes erläutern,
- die verschiedenen Ausbauförmungen von Wasserkraftwerken beschreiben,
- den Aufbau und die Einsatzmöglichkeiten von Wind- und photovoltaischen Kraftwerken erläutern,
- den Einsatz der verschiedenen Kraftwerke im Bereich der öffentlichen Elektrizitätsversorgung begründen.

## ■ 2.1 Energieformen

Die Natur stellt dem Menschen Energie in vielfältiger Form (z.B. Licht-, Wärme-, Kernenergie) zur Verfügung. Nur selten jedoch kann diese vom Menschen dort genutzt werden, wo sie von der Natur bereitgestellt wird. Es sind deshalb Systeme notwendig, die die verschiedenen Primärenergien in gut speicherbare und/oder transportierbare Sekundärenergien umwandeln, um diese dann an einem gewünschten Ort zu einer gewünschten Zeit in die gewünschte Nutzenergie umwandeln zu können.

Zu den wichtigsten Sekundärenergien zählt neben den Kraftstoffen, Heizölen und Erdgas mit ca. 20% (Sektor Haushalte in Deutschland) die elektrische Energie. Sie wird in Kraftwerken unterschiedlichster Art und Leistungsgröße aus fast allen Primärenergien gewonnen.



Energieformen, die unmittelbar der Natur entnommen werden, bezeichnet man als Primärenergien.

Energieformen, die zum Zwecke des besseren Transports oder der Speicherung aus Primärenergien gewonnen werden, bezeichnet man als Sekundärenergien.

**Tabelle 2.1** Energieformen

Primärenergien	Sekundärenergien
feste, flüssige, gasförmige Brennstoffe	elektrische Energie
Kernbrennstoffe	Benzin, Heizöl
Wasserkraft	Fernwärme
Meeresenergie	
Windkraft	
Erdwärme	
Sonnenstrahlung	
Biomasse	

Unter allen Energieformen nimmt die elektrische Energie eine Schlüsselposition ein, da sie auf vielfältige Art wirtschaftlich erzeugt, transportiert und wieder in andere Energieformen umgewandelt werden kann.

## ■ 2.2 Wärmekraftwerke

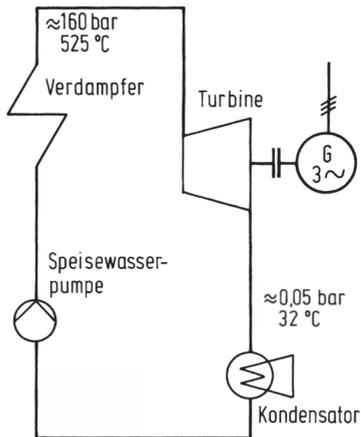
### 2.2.1 Allgemeines

Der größte Teil der elektrischen Energie wird in den meisten Ländern noch immer in Wärmekraftwerken gewonnen. Dampfkraftwerke sind Anlagen, die in mehreren Stufen

- die Energie fossiler Brennstoffe (Kohle, Öl, Gas),
- die Energie von Kernbrennstoffen (Uran),
- die Strahlungsenergie der Sonne,
- die Wärmeenergie im Erdinneren

in elektrische Energie umwandeln. Prinzipiell arbeiten alle Dampfkraftwerke nach dem gleichen Verfahren entsprechend Bild 2.1.

Wärmeenergie wird in einem Verdampfer in Bewegungsenergie des Dampfes umgesetzt. Der Dampf durchströmt anschließend eine Turbine und gibt dabei einen Teil seiner Energie in Form von Rotationsenergie ab. Die Turbine treibt einen Generator an, der die Rotationsenergie in elektrische Energie umwandelt. Die Restenergie des Abdampfes wird über einen Kondensator mit nachgeschaltetem Kühlsystem an die Umwelt abgegeben. Die wesentlichen Unterschiede zwischen den verschiedenen Arten von Wärmekraftwerken liegen in der ersten Umwandlungsstufe, d.h. in der Umwandlung der Primärenergie in die Wärmeenergie des Arbeitsstoffes. Als Arbeitsstoff verwenden Dampfkraftwerke Wasser. Dieses



**Bild 2.1**  
Prinzipschaltplan eines Dampfkraftwerkes

durchläuft bei den Energieumwandlungen einen Kreisprozess, in welchem es sowohl in flüssiger als auch in dampfförmiger Form vorkommt.

Je nach Kraftwerksart können die Zustandsgrößen des Wassers folgende Werte annehmen:

- Drücke: 0,05 bar ... 300 bar,
- Temperaturen: 290 K ... 850 K.

## 2.2.2 Arbeitsprozess der Dampfkraftanlage

Für den Arbeitsstoff Wasser gibt es keine exakten Gleichungen zur Bestimmung der Zustandsgrößen. Man arbeitet deshalb mit experimentell bestimmten Werten, die in Zustandsdiagrammen oder Zustandstabellen festgehalten sind. Der ideale Kreisprozess des Wassers (Clausius-Rankine-Prozess) wird nachfolgend anhand des T,s-Diagramms (Bild 2.2) erläutert.

Als spezifische Entropie wird das Verhältnis der Wärmemenge  $Q$  zur Temperatur  $T$  je kg eines Arbeitsstoffes bezeichnet. So hat z.B. bei einem Druck von 1 bar und einer Temperatur von 373 K das Wasser ( $x = 0$ ) eine spezifische Entropie von  $1,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ . Durch Zuführung der Verdampfungswärme steigt die spezifische Entropie bis zur vollständigen Verdampfung ( $x = 1$ ) auf  $7,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$  an, wobei die Temperatur konstant bleibt.



Es bedeuten:

- $T$  ... Temperatur in K
- $s$  ... spezifische Entropie in  $\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$
- $x$  ... Dampfgehalt

Von den Grenzkurven für  $x = 0$  und  $x = 1$  wird das Nassdampfgebiet umschlossen. Links von der unteren Grenzkurve liegt das Flüssigkeitsgebiet, rechts von der oberen Grenzkurve







### Übung 2.1

Es soll angenommen werden, dass alle Zustände des T,s-Diagramms technisch realisiert werden könnten. Wie müsste dann der vorgeschriebene Kreisprozess verändert werden, damit eine größere mechanische Arbeit gewonnen werden kann?



### Übung 2.2

Begründen Sie, warum im Kreisprozess eine Kondensation des Dampfes (5)-(6) erfolgen muss und nicht eine denkbare Verdichtung mit Kompressoren auf den Ausgangsdruck von  $p_1 = 100\text{bar}$  durchgeführt werden kann.

Im Kreisprozess nach Bild 2.2 beträgt der Dampfgehalt des Abdampfes (Punkt 5) nur noch 80% ( $x = 0,8$ ). Zum Schutz der Turbinenschaufeln sollte der Dampf jedoch keine größere Nässe als 10% erreichen, da die sich bildenden Wassertröpfchen wegen ihrer hohen Aufprallgeschwindigkeit Beschädigungen an der Turbine hervorrufen würden. Eine geringere Nässe erreicht man, wenn der aus der Turbine austretende Dampf, kurz bevor der Dampfzustand das Nassdampfgebiet erreicht, nochmals in den Dampferzeuger zurückgeführt und auf die Überhitzungstemperatur  $T_4$  wieder aufgeheizt wird. Diesen Vorgang nennt man Zwischenüberhitzung. Wie aus Bild 2.4a hervorgeht, kann die Zwischenüberhitzung nur bei einem niedrigeren Druck (5'-4) erfolgen. Nach der Zwischenüberhitzung wird der Dampf zum Mitteldruckteil der Turbine geleitet, deren Welle mit dem Hochdruckteil starr gekoppelt ist (Bild 2.4b). Zur besseren Ausnutzung wird der Abdampf des Mitteldruckteils meistens noch in einem nachgeschalteten Niederdruckteil weiter entspannt.

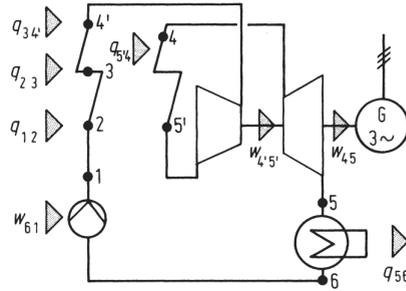
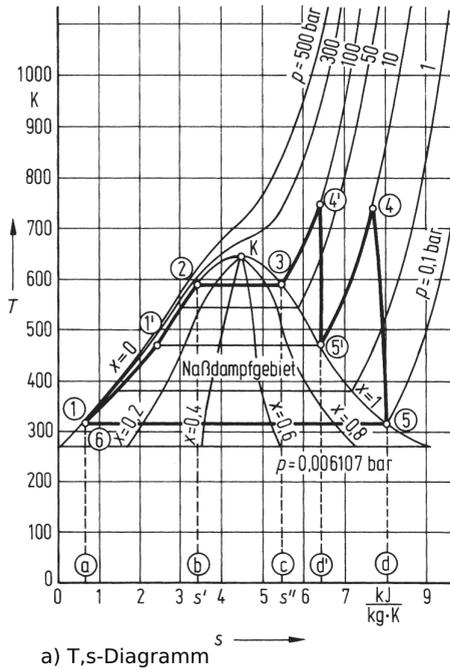


### Übung 2.3

Wie verändert sich die gewinnbare mechanische Arbeit durch Zwischenüberhitzung des Dampfes?

Die einzelnen Teilprozesse des Wasser-Dampf-Kreisprozesses laufen in folgenden Anlagenteilen der Dampfkraftanlage ab (Bild 2.4a):

- Der Verdampfer führt die Flüssigkeitswärme  $q_{12}$ , die Verdampfungswärme  $q_{23}$  und die Überhitzungswärme  $q_{34}$ , zu (Fläche 1-2-3-4'-d'-a).
- Der Zwischenüberhitzer führt die Überhitzungswärme  $q_{5'4}$  zu (Fläche 5'-4-d-d').
- Der Hochdruckteil der Turbine gibt die mechanische Arbeit  $w_{4'5'}$  an den Generator ab (Fläche 1'-2-3-4'-5').
- Der Mitteldruckteil der Turbine gibt die mechanische Arbeit  $w_{45}$  an den Generator ab (Fläche 1-1'-5'-4-5).
- Der Kondensator führt die Kondensationswärme  $q_{56}$  an den Kühlkreislauf ab (Fläche a-6-5-d).
- Die Speisewasserpumpe bringt das Speisewasser auf den Verdampferdruck und führt ihm dabei eine vernachlässigbar kleine Wärmemenge  $w_{61}$  zu.



**Bild 2.4** Dampfkraftwerksprozess mit Zwischenüberhitzung

Zur Bewertung eines Kreisprozesses wird folgende allgemeine Definition angewendet:

$$\text{Wirkungsgrad} = \frac{\text{Nutzenergie}}{\text{zugeführte Energie}}$$

Für den Kreisprozess in Bild 2.2 errechnet sich somit der sogenannte thermische Wirkungsgrad wie folgt:

$$\eta_{\text{th}} = \frac{w_{45}}{q_{12} + q_{23} + q_{34} + w_{61}}$$



### Beispiel 2.1

Für den Kreisprozess aus Bild 2.2 soll der thermische Wirkungsgrad ermittelt werden.

*Lösung:*

Durch Auszählen (Planimetrieren) der Flächen unter den verschiedenen Kurvenabschnitten des T,s-Diagramms erhält man für:

$$q_{12} = 1220 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{23} = 1240 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{34} = 820 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$q_{56} = 1950 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$w_{61} = 0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \quad w_{45} = q_{12} + q_{23} + q_{34} + w_{61} - q_{56} = 1330 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\eta_{\text{th}} = \frac{w_{45}}{q_{12} + q_{23} + q_{34} + w_{61}} = \frac{1330 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}}{3280 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}} = 0,405 = 40,5\%$$



### Übung 2.4

Ermitteln Sie den thermischen Wirkungsgrad für den Kreisprozess in Bild 2.4.

Wie aus Übung 2.4 hervorgeht, wird der thermische Wirkungsgrad durch die Zwischenüberhitzung des Dampfes erhöht. Eine weitere Verbesserung erreicht man durch eine Vorwärmung des Speisewassers. Hierbei werden durch Anzapfen der Turbine Teile des Dampfes entnommen und Wärmetauschern im Speisewasserkreis zugeführt. Der thermische Wirkungsgrad hängt ab:

- vom Kondensationsdruck (Gegendruck),
- von Dampfdruck und -temperatur,
- von der Zwischenüberhitzung,
- von der Speisewasservorwärmung.



### Übung 2.5

Begründen Sie mit Hilfe der Wasserdampf tabel, Tabelle 2.2, warum in Kraftwerken der Kondensationsdruck praktisch nicht unter 0,05 bar abgesenkt werden kann.

**Tabelle 2.2** Auszug aus der Wasserdampf tabel (Sättigungszustand)

$p$ in bar	$t$ in °C
0,01	6,9828
0,02	17,513
0,03	24,1
0,04	28,983
0,05	32,898
0,06	36,183
0,07	39,025
0,08	41,534
0,09	43,787



### Übung 2.6

Wodurch wird die Höhe des Dampfdruckes und der Dampftemperatur in der Praxis begrenzt?



### Übung 2.7

Weisen Sie anhand des T,s-Diagramms nach, dass der thermische Wirkungsgrad durch eine Speisewasservorwärmung verbessert werden kann.

Bei dem beschriebenen Wasser-Dampf-Kreisprozess wurde davon ausgegangen, dass die Dampfkraftanlage verlustlos arbeitet. In der Praxis führen jedoch Einflussgrößen wie z.B. Wärmeverluste der Kesselanlage und der Rohrleitungen, Strömungsverluste in den Rohrleitungen, Ventilen, Pumpen und in der Turbine dazu, dass der erreichbare thermische Wirkungsgrad entsprechend geringer ist. Moderne Dampfkraftwerke erreichen einen thermischen Wirkungsgrad von 50%.

### 2.2.3 Fossil befeuerte Kraftwerke

Alle fossil befeuerten Kraftwerke sind nach dem gleichen Prinzip aufgebaut. Am Beispiel eines Braunkohle-Dampfkraftwerkes sollen die wichtigsten Funktionsbereiche und Anlagenteile eines Kraftwerkes nachfolgend beschrieben werden. Bild 2.5 zeigt das Wärmeschaltbild eines 600 MW-Blocks des Kraftwerkes Neurath der Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerk Aktiengesellschaft (RWE).

Im Kessel wird die aufbereitete Kohle verfeuert. Der entstehende Dampf wird im Überhitzer weiter erwärmt, über die Dampfleitung dem Hochdruckteil einer dreistufigen Turbine zugeführt, die den Generator antreibt. Der entspannte und abgekühlte Dampf, welcher der zweiteiligen Niederdruckstufe der Turbine entströmt, wird in dem nachgeschalteten Kondensator durch Kühlung mit Kühlwasser kondensiert. Das Kondensat wird von der Kondensatpumpe über Speisewasservorwärmer (Niederdruck-Wärmetauscher) in den Speisewasserbehälter gefördert und von da mit der Speisewasserpumpe über Speisewasservorwärmer (Hochdruck-Wärmetauscher) wieder zum Verdampfen in den Kessel gepumpt. Das Speisewasser wird durch Entnahmedampf sowohl aus der Hochdruckstufe als auch aus der Mitteldruckstufe und den Niederdruckstufen vorgewärmt.



#### Übung 2.8

Ermitteln Sie näherungsweise aus dem Wärmeschaltbild in Bild 2.5 mit Hilfe des T,s-Diagramms (Bild 2.6) die Zustandsgrößen Druck und Temperatur

- des Dampfes vor der Zwischenüberhitzung (Annahme  $x = 1$ ),
- des zwischenüberhitzten Dampfes,
- des Kondensates,
- des Speisewassers vor Eintritt in den Dampferzeuger,
- des Entnahme-Sattdampfes zum Antrieb der Speisewasserpumpe.

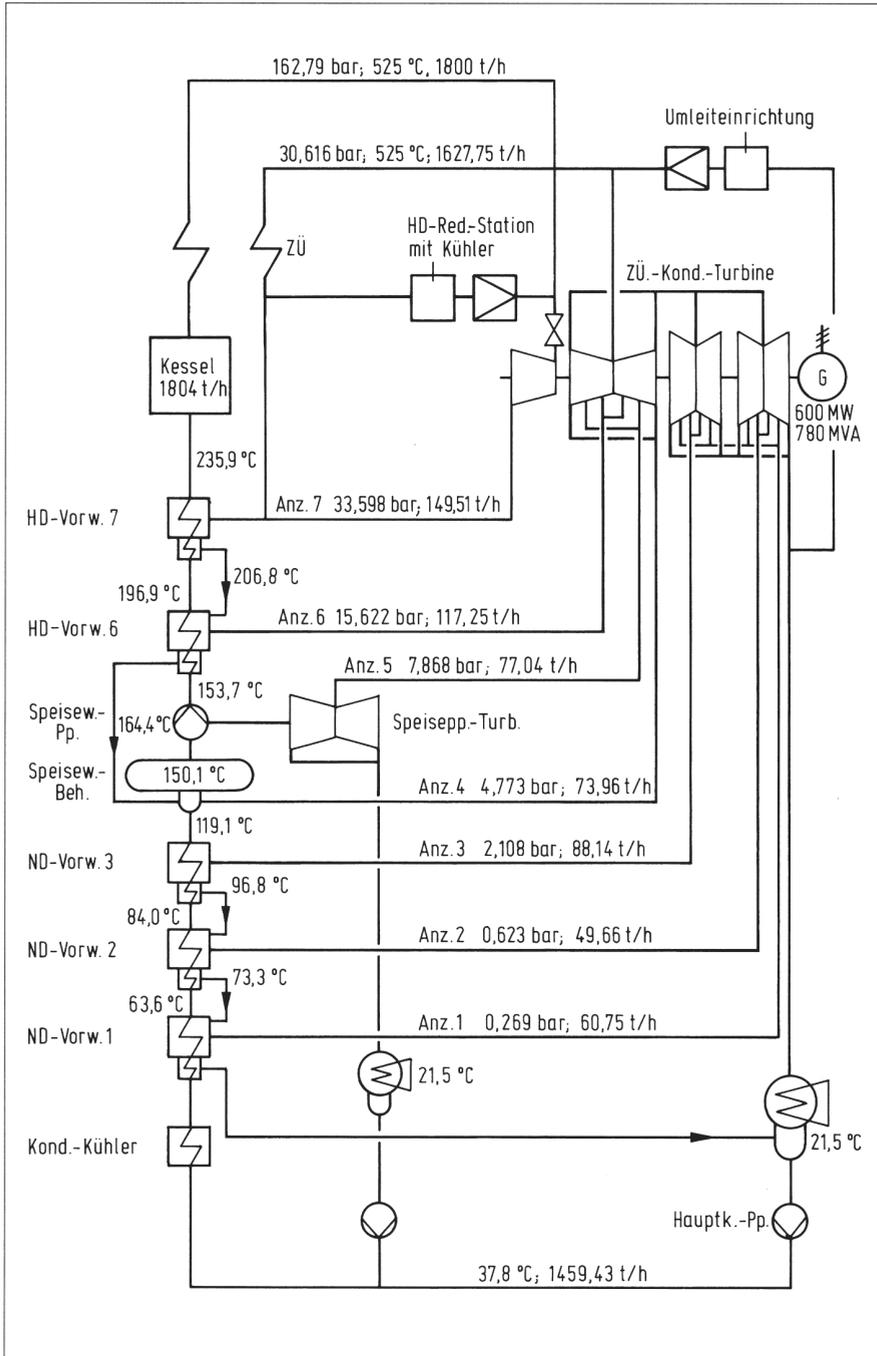


#### Übung 2.9

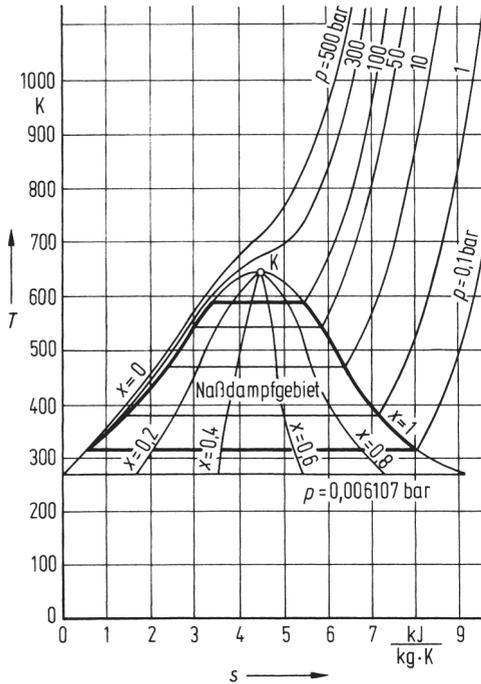
Welche Aufgabe hat die Hauptkondensatpumpe?

#### 2.2.3.1 Dampferzeuger

Die Verbrennung der Kohle erfolgt etwa bei Temperaturen von 1500 K. Die heißen Rauchgase strömen an den Rohren des Dampferzeugers vorbei nach oben (Bild 2.7) und geben dabei Wärme an die verschiedenen Rohrsysteme ab. Der Dampferzeuger ist so aufgebaut, dass ein möglichst optimaler Wärmeübergang von den Rauchgasen auf das Wasser



**Bild 2.5** Wärmeschaltbild 600 MW-Block des Braunkohle-Kraftwerkes Neurath



**Bild 2.6**  
T,s-Diagramm für Wasserdampf

bzw. auf den Dampf erfolgen kann. Danach verlassen die Rauchgase den Dampferzeuger, durchströmen den Luftvorwärmer und werden in nachgeschalteten Rauchgasreinigungsanlagen entstaubt, entstickt und entschwefelt. Anschließend werden sie über einen Kamin an die Umwelt abgegeben.

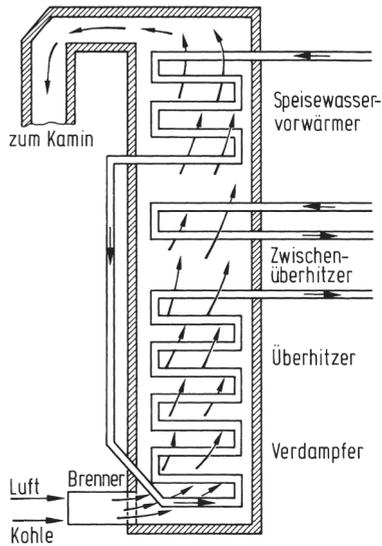
### 2.2.3.2 Turbine

In der Turbine wird ein Teil der im Dampf enthaltenen Wärmeenergie in einzelnen Stufen in Rotationsenergie umgewandelt. Zu jeder Stufe gehört ein Kranz von Leitschaufeln (das sogenannte Leitrad), die den Dampf jeweils unter dem günstigsten Winkel auf die mit der Welle fest verbundenen Laufschaufeln (das sogenannte Laufrad) leiten (Bild 2.8a).

Beim Auftreffen auf die Laufräder wird der Dampf umgelenkt und übt dabei eine Kraft aus, welche die Laufräder und damit die Welle in Bewegung setzt (Bild 2.8b). Die Strömung des Dampfes in der Turbine wird durch die Druckdifferenz zwischen Dampferzeuger (z.B. 163 bar) und Kondensator (z.B. 0,06 bar) hervorgerufen.

Turbinen, welche ein großes Druckgefälle verarbeiten müssen, benötigen eine große Anzahl von Stufen. Da mit abnehmendem Druck das Volumen des Dampfes zunimmt, müssen die Schaufeln in Strömungsrichtung des Dampfes länger ausgeführt werden.

Die vielen Stufen lassen sich nicht in einem Gehäuse unterbringen, weil die Lagerabstände der Welle und die Temperaturunterschiede im Gehäuse zu groß werden.

**Bild 2.7****Prinzip eines Dampferzeugers**

Den verschiedenen Temperaturzonen im Dampferzeuger sind bestimmte Rohrleitungssysteme zugeordnet:

- Im Feuerraum befindet sich der Verdampfer, in welchem der Übergang von Wasser in Dampf erfolgt.
- Darauf folgt der Überhitzer, in welchem der Dampf auf die Überhitzungstemperatur erhitzt wird.
- Im Zwischenüberhitzer wird dem Dampf nach Durchströmen des Hochdruckteils der Turbine nochmals Wärmeenergie zugeführt.
- Am Ende der Heizflächen des Dampferzeugers wird das Speisewasser erwärmt.

Man unterteilt die Turbine daher meist in die drei Gehäuseteile:

- Hochdruckteil (HD),
- Mitteldruckteil (MD),
- Niederdruckteil (ND).

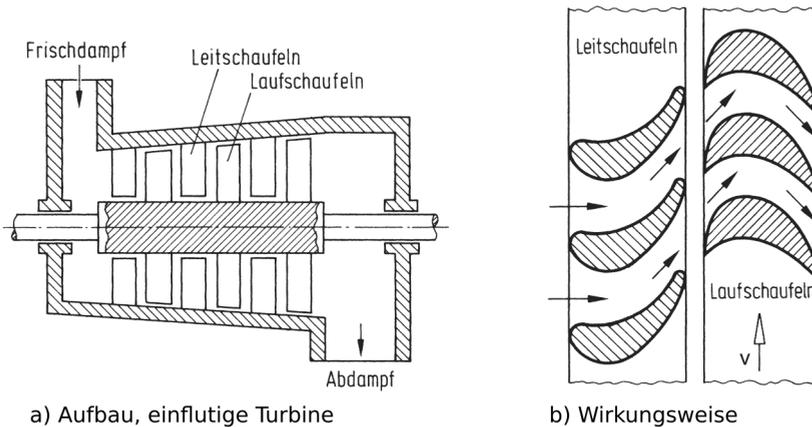
Außerdem unterscheidet man bei den Gehäuseteilen noch zwischen einflutigen und doppeflutigen. Bei einer einflutigen Turbine strömt der Dampf in einer Richtung durch die Turbine (Bild 2.8a). Bei doppeflutigen Turbinen strömt der Dampf in der Mitte der Turbine ein und teilt sich in zwei Richtungen auf (Bild 2.9). Dies hat den Vorteil, dass sich die Kräfte in axialer Richtung aufheben. Hochdruckteile sind meist einflutig, Mittel- und Niederdruckteile sind meist doppeflutig ausgeführt.

### 2.2.3.3 Kondensator

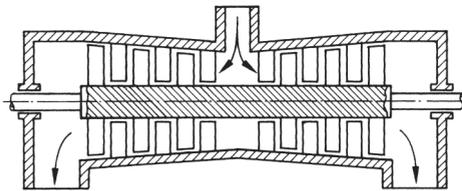
Um das ausnutzbare Wärmegefälle zu vergrößern, muss der Dampf im Kondensator niedergeschlagen werden, was einen Entzug größerer Energiemengen notwendig macht. Hierfür sind beträchtliche Kühlwassermengen erforderlich. Je niedriger die Kühlwassertemperatur ist, desto besser ist das Vakuum und damit die Ausnutzung der Dampfenergie, d.h. desto größer wird der thermische Wirkungsgrad.

Der Kondensator besteht aus einer Kammer, in der ein umfangreiches Rohrleitungssystem aus vielen tausend Messingrohren installiert ist. Durch dieses Rohrleitungssystem wird Kühlwasser gepumpt. An der Außenseite der Rohre kondensiert der Dampf und gibt dabei seine Kondensationswärme an das Kühlwasser ab. Die aus den Rohren gebildete Kondensationsfläche beträgt bei einer 600-MW-Turbine etwa  $23000 \text{ m}^2$ . Der Kühlwasserbedarf liegt bei etwa  $52000 \text{ m}^3/\text{h}$ .

Das kondensierte Wasser wird von der Hauptkondensatpumpe abgesaugt und in den Speisewasserbehälter gepumpt. Der Speisewasserbehälter übernimmt im gesamten Kreislauf



**Bild 2.8** Prinzipieller Aufbau und Wirkungsweise der Dampfturbine



**Bild 2.9**  
Prinzip einer doppelflutigen  
Turbine

eine Pufferfunktion und sorgt zusätzlich für eine Beseitigung der im Wasser gelösten Gase. Diese Entgasung ist sehr wichtig, da insbesondere der Sauerstoff durch Korrosion die Rohrleitungen und Turbine gefährdet.

#### 2.2.3.4 Speisewasserpumpe

Die Speisewasserpumpe fördert das Speisewasser aus dem Speisewasserbehälter mit hohem Druck (z.B. 163 bar) in das Rohrleitungssystem des Dampferzeugers. Für einen 600-MW-Kraftwerksblock ist hierfür ein Leistungsbedarf von etwa 14 MW erforderlich. Moderne Speisewasserpumpen werden deshalb meist direkt von einer eigenen, kleinen Turbine angetrieben. Bei älteren Anlagen und kleineren Kraftwerksblöcken werden auch Elektromotoren als Antriebe eingesetzt.

#### 2.2.3.5 Kraftwerkswirkungsgrad

Wie aus der Energiebilanz des Wasser-Dampf-Kreisprozesses hervorgeht, ist es nicht möglich, die gesamte zugeführte Wärme in mechanische Arbeit umzuwandeln. Dazu kommen die Verluste in den verschiedenen Anlagenteilen sowie der Eigenbedarf des Kraftwerkes.

Bei fossil befeuerten Kraftwerken liegt der Wirkungsgrad zwischen 35 und 42%. Das bedeutet, dass 58 bis 65% der zugeführten Wärme nicht zur elektrischen Energieerzeugung genutzt werden können. Die Bestimmung des Kraftwerkswirkungsgrades erfolgt aus den Betriebsdaten des jeweiligen Kraftwerkes.



### Beispiel 2.2

Aus den Betriebsdaten eines Braunkohlekraftwerkes werden folgende Werte entnommen:

$$\text{tägliche Energieabgabe: } W_{ab} = 62,6 \text{ GWh}$$

$$\text{täglicher Kohleverbrauch: } K = 73000 \text{ t}$$

$$\text{Heizwert der Kohle: } H = 8339 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

*Lösung:*

Der tägliche Kohleverbrauch entspricht einem Wärmeverbrauch von:

$$Q_{zu} = K \cdot H = 73 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot 8339 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 608,747 \cdot 10^9 \text{ kJ}$$

Die Umrechnung in elektrische Energie ergibt:

$$W_{zu} = \frac{Q_{zu}}{3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} = \frac{608,747 \cdot 10^9 \text{ kJ}}{3600 \frac{\text{s}}{\text{h}}} = 169,1 \cdot 10^6 \text{ kWh} = 169,1 \text{ GWh}$$

Damit ist der Kraftwerkswirkungsgrad:

$$\eta_{KW} = \frac{W_{ab}}{W_{zu}} = \frac{62,6 \text{ GWh}}{169,1 \text{ GWh}} = 0,37$$

Die Größe des Kraftwerkswirkungsgrades hängt von den Einzelwirkungsgraden ab, die in den verschiedenen Anlagenteilen erzielt werden. Für moderne Großkraftwerke können näherungsweise folgende Werte angenommen werden:

$$\text{Thermischer Wirkungsgrad: } \eta_{th} = 0,50$$

$$\text{Kesselwirkungsgrad: } \eta_K = 0,95$$

$$\text{Wirkungsgrad der Dampfleitungen: } \eta_L = 0,98$$

$$\text{Wirkungsgrad der Turbine: } \eta_T = 0,87$$

$$\text{Wirkungsgrad des Generators: } \eta_G = 0,98$$

$$\text{Eigenbedarfsfaktor: } \epsilon = 0,06$$

Mit den angenommenen Einzelwirkungsgraden errechnet sich der Kraftwerkswirkungsgrad zu:

$$\eta_{KW} = \eta_{th} \cdot \eta_K \cdot \eta_L \cdot \eta_T \cdot \eta_G \cdot (1 - \epsilon) = 0,50 \cdot 0,95 \cdot 0,98 \cdot 0,87 \cdot 0,98 \cdot 0,94 = 0,37$$

Der Kraftwerkswirkungsgrad wird bestimmt:

- durch den thermischen Wirkungsgrad,
- durch die Verluste, die in den einzelnen Anlagenteilen auftreten,
- durch den Eigenbedarf, der für den Betrieb des Kraftwerkes erforderlich ist.

Die Betrachtung der Einzelwirkungsgrade zeigt, dass der größte Teil der nicht nutzbaren Wärme beim Wasser-Dampf-Kreisprozess über das Kühlwasser an die Umwelt abgegeben wird. D.h., dass der Kraftwerkswirkungsgrad wesentlich durch den thermodynamischen Umwandlungsprozess beeinflusst wird.



### Übung 2.10

Ein Kohlekraftwerk soll täglich 48 GWh in das öffentliche Netz einspeisen und dabei mit einem Kraftwerkswirkungsgrad von 36% arbeiten.

Berechnen Sie den täglichen Kohlebedarf  $K$  in t und den spezifischen Kohleverbrauch  $k$  in kg/kWh

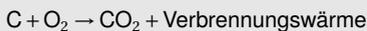
- für ein Braunkohlekraftwerk,
- für ein Steinkohlekraftwerk.

**Tabelle 2.3** Heizwerte verschiedener Energieträger

Energieträger	Menge	Heizwert in kJ
Braunkohle	1 kg	8347
Steinkohle	1 kg	29719
Erdöl (roh)	1 kg	42622
Dieselmotorkraftstoff	1 kg	42705
Klärschlamm	1 kg	8499
Brenntorf	1 kg	14235
Flüssiggas	1 kg	45887
Erdgas	1 m <sup>3</sup>	31736
Erdölgas	1 m <sup>3</sup>	41868
Uran 235	1 kg	$9 \cdot 10^{10}$

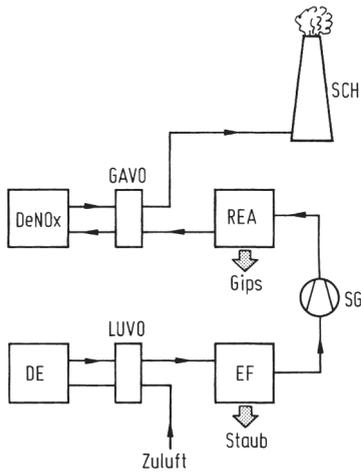
### 2.2.3.6 Rauchgasreinigung

Bestünde die in einem Kohlekraftwerk verfeuerte Kohle aus reinem Kohlenstoff (C) und die Verbrennungsluft aus reinem Sauerstoff (O<sub>2</sub>), so würden die Rauchgase ausschließlich Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) enthalten:



Bei der Verbrennung von Kohle werden jedoch auch die nicht brennbaren Bestandteile freigesetzt. Als Staubablagerungen belasten diese Stoffe die Umwelt und müssen deshalb durch geeignete Filter zurückgehalten werden. Von den verschiedenen Filterarten (Zyklonfilter, Nassfilter, Tuchfilter, Elektrofilter) werden Elektrofilteranlagen am häufigsten eingesetzt. Elektrofilteranlagen filtern mehr als 99% der unverbrennbaren Feststoffe aus dem Rauchgas.

Die Schwefelverbindungen in der Kohle verbrennen zu Schwefeldioxid (SO<sub>2</sub>), das über den sauren Regen die gesamte Umwelt stark belastet. Alle neu errichteten großen Kohlekraftwerke haben deshalb eine Rauchgasentschwefelung. Als wirksamste Methode hat sich das sogenannte Nassverfahren mit Gips als Endprodukt erwiesen. In einem aufwendigen Prozess wird unter Zugabe von Kalkmilch das SO<sub>2</sub> aus dem Rauchgas ausgewaschen und in Gips (Calciumsulfat) umgewandelt.

**Bild 2.10**

Prinzipschaltbild einer Rauchgasableitung

- DE ... Dampferzeuger
- LUVO ... Luftvorwärmer
- EF ... Elektrofilter
- SG ... Sauggasgebläse
- REA ... Rauchgasentschwefelungsanlage
- GAVO ... Rauchgasvorwärmer
- DeNOx ... Rauchgasentstickungsanlage
- SCH ... Schornstein

Rauchgasentschwefelungsanlagen sind in der Lage, über 85 % des Schwefeldioxids aus dem Rauchgas zu entfernen. Die Stickstoffverbindungen in der Kohle sowie die Oxidation des Luftstickstoffes als Folge der hohen Verbrennungstemperatur führen zur Bildung von Stickoxiden. Die schädigende Wirkung von Stickoxiden ist noch nicht im vollen Umfang erforscht. Fest steht offenbar, dass sie wesentlich dazu beitragen, dass für die Pflanzen schädliche Ozon entstehen zu lassen.

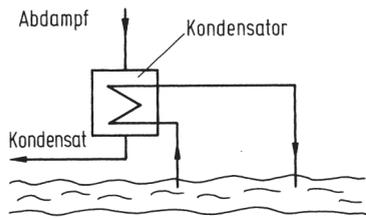
Ferner verursachen sie eine überhöhte Stickstoffbelastung (Überdüngung) der gesamten Natur, die das Gleichgewicht bei der Nährstoffversorgung der Pflanzen beeinträchtigt. Während sich die Verfahren zur Entstaubung und Entschwefelung seit Jahren vielfach bewährt haben, befinden sich z.Zt. noch mehrere Verfahren zur Entstickung in der Erprobungsphase.



Entstickungsanlagen sollen die Stickoxide in den Rauchgasen bis zu 90 % reduzieren.

Bild 2.10 zeigt das Prinzipschaltbild einer Rauchgasableitung über die verschiedenen Rauchgasreinigungsanlagen eines modernen Kohlekraftwerkes. Die Rauchgase durchströmen nach Verlassen des Dampferzeugers die vorgenannten Reinigungsanlagen und werden anschließend mit Hilfe eines oder mehrerer Gebläse in den Schornstein abgeleitet. Dieser verteilt die gereinigten Rauchgase in möglichst hohe Luftschichten, so dass die restlichen Schadstoffe nur noch in geringer Konzentration auf die Erde niedergehen.

Die anfallenden Abfallstoffe Staub und Gips werden von der Bauwirtschaft weiterverwertet (Straßenbau, Betonindustrie, Gipsprodukte). Die Ausrüstung der Kohlekraftwerke mit Rauchgasreinigungsanlagen erfordert einen sehr großen Kapitaleinsatz und mindert darüber hinaus den Gesamtwirkungsgrad eines Kraftwerkes um 1 bis 2 Prozent. Damit steigen die Erzeugungskosten je nach Kohlequalität und Verfahren um fast 1 Cent je kWh.



**Bild 2.11**  
Prinzip einer Durchlaufkühlung



### Übung 2.11

Die Betriebsdaten für den 24-stündigen Betrieb eines 740 MW-Steinkohlekraftwerkes enthalten u.a. folgende Angaben:

6000 t Steinkohleverbrauch; 7,5 % Ascheanteil der Steinkohle; 31 t Grobasche vom Kessel; 416 t Feinasche vom Elektrofilter;  $6 \cdot 10^7 \text{ m}^3$  Rauchgasmenge.

- Mit welcher Staubkonzentration  $p$  in  $\text{mg}/\text{m}^3$  sind die Abgase hinter dem Elektrofilter noch belastet?
- Mit welchem Abscheidegrad  $n$  in % arbeitet der Elektrofilter?

### 2.2.3.7 Kühlverfahren

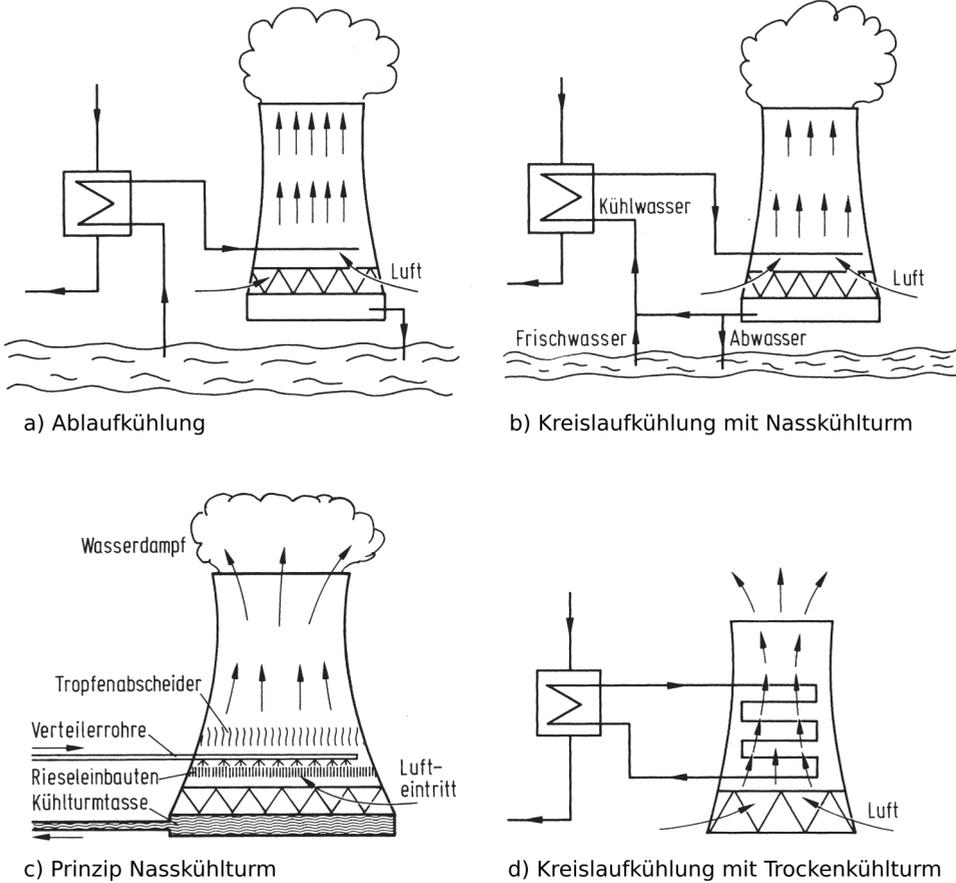
Wie bereits bekannt, erfolgt die Wärmeabfuhr bzw. Kühlung im Kondensator. Je 100 MW Kraftwerksleistung wird dabei der Kondensator je Sekunde von 2 bis  $3 \text{ m}^3$  Kühlwasser durchströmt. Als Kühlwasser kann nur sehr reines Wasser verwendet werden, damit keine Ablagerungen, Verstopfungen und Beschädigungen den Betrieb der Kühlwasserpumpen und des Kondensators beeinträchtigen. Frischwasser, das dem Kühlkreislauf zugeführt wird, muss deshalb vorher eine entsprechende Aufbereitung erfahren.

Das einfachste und wirtschaftlichste Kühlverfahren ist die Durchlaufkühlung (Bild 2.11). Das gesamte benötigte Kühlwasser wird einem Fluss entnommen und diesem nach Aufnahme der Abwärme wieder zugeführt. Der Nachteil dieses Verfahrens besteht darin, dass eine Gewässererwärmung nur im Rahmen ökologisch zulässiger Grenzen erlaubt ist. Damit ist die obere Grenze der zulässigen Kraftwerksleistung entsprechend eingegrenzt.

Die Kraftwerksleistung lässt sich erhöhen, wenn an Stelle der Durchlaufkühlung eine Ablaufkühlung eingesetzt wird (Bild 2.12a). Bei diesem Verfahren wird das erwärmte Kühlwasser zuerst durch einen Kühlturm geleitet, wo es einen großen Teil seiner Wärme an die Umgebungsluft abgibt. Das anschließend wieder in den Fluss eingeleitete Wasser ist dann soweit abgekühlt, dass die zulässige Gewässerbelastung nicht überschritten wird.

Bei nicht ausreichendem Frischwasserangebot ist eine Rückkühlung des Kühlwassers in einem Kühlturm erforderlich. Man spricht dann von einer Kreislaufkühlung. Bild 2.12b zeigt das Prinzip einer Kreislaufkühlung mit einem Nasskühlturm, wie sie heute in Großkraftwerken angewendet wird. Da der Kreislauf nicht vollkommen geschlossen ist, treten Wasserverluste durch Verdunstung auf. Gleichzeitig wird ein geringer Teil des Kühlwassers aus dem Kreislauf abgeleitet und erneuert, um eine Eindickung der Salze im Kühlwasser zu vermeiden.

Aus beiden Verlustquellen ergibt sich, dass die Kreislaufkühlung mit Nasskühlturm einen ständigen Bedarf an Frischwasser benötigt. Bei einem 600 MW-Block sind das etwa  $2400 \text{ m}^3$



**Bild 2.12** Kühlverfahren

je Stunde. Etwa die Hälfte des Frischwassers verdunstet, die andere Hälfte wird als Abwasser abgeleitet.

Im Nasskühlturm (Bild 2.12c) wird das Kühlwasser auf eine Höhe von etwa 10 m gepumpt. Von dort rieselt es aus den Verteilerrohren zur gleichmäßigen Verteilung über ein Plattensystem (Rieseleinbauten) in ein Auffangbecken (Kühlturmtonne). Im Gegenstrom wird es dabei von einem starken Luftzug gekühlt. Die feinen Wassertröpfchen, die durch den Luftzug nach oben gerissen werden, hält der Tropfenabscheider zurück, der oberhalb der Verteilerrohre angeordnet ist.

Der Luftzug wird je nach Bauart künstlich mit Hilfe von Ventilatoren (Ventilator-Kühlturm) oder durch die natürliche Kaminwirkung (Naturzug-Kühlturm) erzeugt. Nasskühltürme werden heute bei allen großen Wärmekraftwerken verwendet. Sie sind technisch ausgereift und wirtschaftlich. Allerdings wird immer wieder die Frage diskutiert, in welchem Maße sie die Umwelt beeinträchtigen.

Dabei geht es im einzelnen um die Klärung folgender Fragen:

- Wie steht es mit Schattenbildung?
- Wie steht es mit erhöhten Niederschlägen, Nebel- und Glätteisbildung?
- Wie steht es mit Ablagerungen von Salzen?
- Wie steht es mit Temperaturveränderung?
- Wie steht es mit Emission schädlicher Keime?
- Wie steht es mit Emission von Asbest und Schmutzstoffen?
- Wie steht es mit Geräuschbelästigung?
- Wie steht es mit Radioaktivität?

Die Antworten können nur durch Gutachten für jeden speziellen Fall gegeben werden. Sicher ist, dass Nasskühltürme in ihrer nahen Umgebung einige Auswirkungen meteorologischer Art haben. Deshalb haben häufig sowohl die Kraftwerke als auch Umweltschutzorganisationen bzw. örtliche Bürgerinitiativen Messstationen eingerichtet, die bestimmte Einflussgrößen überwachen und eventuelle Veränderungen in der Umwelt über längere Zeit registrieren.



### Übung 2.12

Ein 600 MW-Block mit Kreislaufkühlung hat bei Vollastbetrieb einen Frischwasserbedarf von  $2400 \text{ m}^3/\text{h}$ . Wie viele kg Kühlwasser werden je kWh erzeugter elektrischer Energie verdunstet?

Um die nachteiligen Auswirkungen der Nasskühlung auf die Umwelt in Zukunft auszuschalten, bemüht man sich heute um die Entwicklung von Trockenkühltürmen. In diesen bleiben Wasser und Luft voneinander getrennt (Bild 2.12d). Das Wasser kreist in Rohren, an denen die Luft vorbeistreicht. Damit wird eine Verdunstung vermieden, so dass keine Wasserdampfschwaden entstehen. Da jedoch auf den starken Kühleffekt der Verdunstung verzichtet wird, ist die trockene Kühlung weniger wirkungsvoll. Dieser Nachteil muss durch größere Kühlflächen ausgeglichen werden. Nach dem heutigen Stand der Technik ist ein Trockenkühlturm zweieinhalb bis dreimal größer als ein Nasskühlturm gleicher Leistung.

### 2.2.3.8 Kraft-Wärme-Kopplung

Wie aus den Betrachtungen zum Kraftwerkswirkungsgrad hervorgeht, wird der größte Teil der nicht nutzbaren Wärme über das Kühlwasser an die Umwelt abgegeben. Diese Tatsache führt zu der Überlegung, die Abwärme zu Heizzwecken weiter zu nutzen und so den Gesamtwirkungsgrad bei der Nutzung der Primärenergie zu erhöhen.



Den Verbund eines Wärmekraftwerkes mit einer Wärmeverbrauchsanlage (z.B. Fernheizung) bezeichnet man als Kraft-Wärme-Kopplung.

Eine Kraft-Wärme-Kopplung kann allerdings nicht bei jedem Wärmekraftwerk angewendet werden, da für die Nutzung der Abwärme bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein müssen. Für Fernheizzwecke werden Vorlauftemperaturen um 400 K benötigt. Diese Tempe-

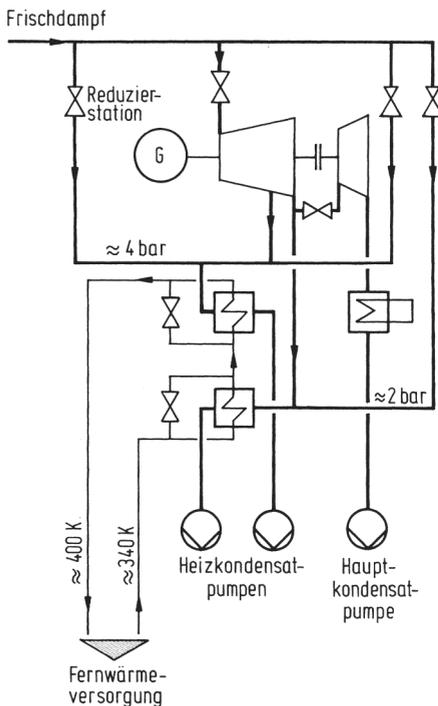
raturen können nur erreicht werden, wenn der Dampf vorzeitig die Turbine verlässt. Dadurch wird zwar die elektrische Energieausbeute geringer, da aber ein Teil der Abwärme zur Beheizung von Wohnräumen oder technischen Einrichtungen genutzt wird, steigt der Gesamtwirkungsgrad des Energieumwandlungsprozesses an. Für eine Vorlauftemperatur von 400 K muss der Dampf bereits bei  $p > 2$  bar der Turbine entnommen werden.

Der Bedarf an Wärme ist im allgemeinen auf die Heizperiode während der kalten Jahreszeit beschränkt. Ein Kraftwerk hingegen muss aus wirtschaftlichen Gründen das ganze Jahr über in Betrieb sein. Außerhalb der Heizperiode muss die Abwärme über ein Kühlsystem an die Umwelt abgegeben werden. Damit sinkt der Gesamtwirkungsgrad entsprechend ab.

Bei Heizkraftwerken mit Fernwärmeversorgung richtet sich somit der Gesamtwirkungsgrad nach der jeweiligen Betriebsweise. In Zeiten geringen Wärmebedarfs muss ein Teil der Abwärme über die Kühlung an die Umwelt abgegeben werden. In Zeiten hohen Wärmebedarfs hingegen kann der Vorteil der Kraft-Wärme-Kopplung genutzt werden.

Wegen der hohen Kosten des Fernheizungsnetzes ist ein wirtschaftlicher Transport der Heizwärme nur im Umkreis von etwa 40 km gegeben. Es muss deshalb ein räumlich dicht angesiedelter Abnehmerkreis vorhanden sein, um die Wärme kostengünstig anbieten zu können. Die Kraft-Wärme-Kopplung ist nur in dicht besiedelten Gebieten wirtschaftlich.

Aus den genannten Voraussetzungen ergibt sich, dass ein Kraftwerk mit Kraft-Wärme-Kopplung (Heizkraftwerk) in seiner Konzeption den speziellen Bedingungen angepasst sein muss. Bild 2.13 zeigt den prinzipiellen Aufbau der Kraft-Wärme-Kopplung in einem Heizkraftwerk.



**Bild 2.13**  
Kraft-Wärme-Kopplung in einem  
Heizkraftwerk

Der Frischdampf durchströmt die zweigehäusige Turbine, die im Hochdruckteil zwei Anzapfungen zur Auskopplung von Dampf für die Fernwärmeversorgung besitzt. Der Abdampf des Niederdruckteils wird im Kondensator niedergeschlagen und gibt dabei seine Restwärme über das Kühlwasser und den Kühlturm an die Umgebung ab. Übersteigt der Wärmebedarf der Fernheizung einen bestimmten Betrag, dann wird der Niederdruckteil abgekoppelt, so dass die Turbine im reinen Gegendruckbetrieb arbeitet.

Der vorzeitig ausgekoppelte Dampf (Dampfdruck je nach Anzapfung 2 bis 15 bar) wird durch mehrere Wärmetauscher, die von dem Heizwasser des Fernwärmenetzes durchströmt werden, geleitet. Dabei kondensiert der Dampf und überträgt die Kondensationswärme auf das Heizwasser, das sich dabei auf etwa 400 K erwärmt. Diese Art der Kraft-Wärme-Kopplung nennt man wegen des über Normaldruck liegenden Dampfdruckes an den Anzapfungen der Turbine Gegendruckbetrieb. Anwendung findet die Kraft-Wärme-Kopplung:

- in großen Industrieanlagen, die das ganze Jahr über Heizdampf benötigen und deshalb ihren Bedarf an Wärme- und elektrischer Energie aus betriebseigenen Heizkraftwerken decken,
- in Städten und Großgemeinden, die wegen der zunehmenden Umweltverschmutzung durch kleine Heizanlagen sowie der Nachfrage nach größerem Wohnkomfort zentrale Fernwärmeversorgungsanlagen betreiben.

### 2.2.3.9 Elektrische Anlage

Kernstück der elektrischen Anlage eines Kraftwerkes sind die Synchrongeneratoren. Tabelle 2.4 zeigt die technischen Daten von zwei Generatoren unterschiedlicher Leistung im Kohlekraftwerk Niederaussem.

**Tabelle 2.4** Generatordaten

		Generator A	Generator B
Drehfrequenz	1/min	3000	3000
Leistung	MVA	214	780
Spannung	kV	10,5	21
Strom	kA	11,8	21,5
Leistungsfaktor	$\cos \varphi$	0,7	0,77
Kühlmittel		H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
Kühlmitteldruck	bar	2	5

Während die Generatoren in Kohlekraftwerken normalerweise einheitlich mit der Drehfrequenz von  $3000 \text{ min}^{-1}$  drehen (in Kernkraftwerken ist die Drehfrequenz wegen der größeren Turbinenabmessungen geringer), sind die Klemmenspannungen je nach Leistungsgröße unterschiedlich. Gebräuchliche Generatorspannungen sind:

- 6,30 kV ... für kleinere Einheiten,
- 10,5 kV ... bis 150 MW,
- 21,0 kV ... bis 740 MW,
- 27,0 kV ... bis 1300 MW (Kernkraftwerke).

Die großen Wärmeverluste, die bei der Energieumwandlung in den großen Leistungseinheiten entstehen, erfordern eine besonders wirkungsvolle Kühlung der Wicklungen. Am weitesten verbreitet sind:

- **Wasserstoffkühlung:**  
Durch den gesamten Generatorinnenraum wird Wasserstoff ( $H_2$ ) als Kühlgas gedrückt, das in einem nachgeschalteten Kühler ständig rückgekühlt wird.
- **Wasserkühlung:**  
Die Wicklungen des Generators sind als Hohlleiter ausgebildet, durch die vollentsalztes und damit nicht leitfähiges Wasser als Kühlmedium gepumpt wird. Ein Kühler sorgt auch hier für ständige Rückkühlung.

Die Erregung eines Generators erfolgt entweder durch eine Erregermaschine, die starr mit der Generatorwelle gekuppelt ist, oder über Gleichrichter, welche direkt von den Generatorklemmen gespeist werden.

Zur Einspeisung der elektrischen Leistung in das Höchstspannungsnetz wird die Generatorspannung von einem sogenannten Maschinentransformator auf die Netzspannung transformiert.

Maschinentransformatoren sind je nach Kraftwerksleistung als Dreiphasentransformatoren oder als Transformatorenbank aus drei Einphasentransformatoren ausgeführt. Tabelle 2.5 enthält die technischen Daten der Maschinentransformatoren zu den Generatoren in Tabelle 2.4.

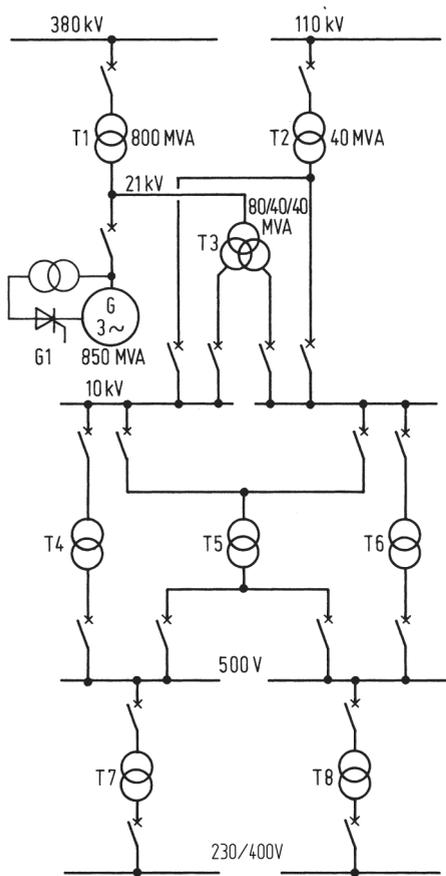
**Tabelle 2.5** Transformatordaten

	Einheit	Maschinen-Trafo A	Maschinen-Trafo B
Bemessungsleistung	MVA	200	3 · 266
Bemessungsspannung	kV	10,5/245	21/420
Bemessungsstrom	kA	11/0,47	21,9/1,09
Kurzschlussspannung	%	13	15,5
Schaltgruppe		Yd5	Yd5

Dampferzeuger, Turbine, Generator und Maschinentransformator bilden innerhalb eines Kraftwerks eine Systemeinheit, die als Block bezeichnet wird.

Durch diese Blockbildung werden Störungen räumlich begrenzt und ein Totalausfall des Kraftwerkes vermieden. Ferner sind einzelne Blöcke übersichtlicher und deshalb wartungs- und bedienungsfreundlicher als eine komplette Großanlage.

Bild 2.14 zeigt den Übersichtsschaltplan eines Blockes mit der zugehörigen Eigenbedarfsanlage.



**Bild 2.14**  
Elektrische Anlage eines Kraftwerks-  
blockes

Die im Generator G1 erzeugte elektrische Energie wird mit 21 kV dem Maschinentransformator T1 zugeführt, dort auf 380 kV hochgespannt und in das Versorgungsnetz eingespeist. Über den Maschinentransformator kann in umgekehrter Energieflussrichtung die elektrische An- und Abfahrerenergie des Blockes aus dem 380 kV-Netz bezogen werden. Hierzu wird der Generator mit dem Generatorschalter vom Netz getrennt. Das 380 kV-Netz versorgt dann über den Dreiwickler-Eigenbedarfstransformator T3 den Block.

Für die verschiedenen Verbraucher im Block stehen die Versorgungsspannungen 10 kV, 500 V und 230/400 V zur Verfügung. Bei elektrischen Störungen im Bereich zwischen Generator und 380 kV-Netz, die zum Ausfall der Eigenversorgung führen würden, kann auf die Versorgung durch das 110 kV-Netz über den Transformator T2 umgeschaltet werden. Damit wird ein sicheres Abfahren des Blockes gewährleistet.

Bild 2.15 zeigt den Übersichtsschaltplan der gesamten elektrischen Anlage des Braunkohlekraftwerkes Neurath der RWE.