

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



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

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

Lektorat: Frank Katzenmayer

Herstellung: Frauke Schafft

Covergestaltung: Max Kostopoulos

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

Titelbild: © 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 Kenntniss 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



Definitionen, Regeln und Hervorhebungen

Die Lösungsteile der Übungsbeispiele und Lernzielfragen sind nun auf 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, bzw. bei Austrian Standards International, Heinestraße 38, A-1020 Wien, 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. 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, erhältlich sind.

Inhalt

1	Übersicht über die elektrische Anlagentechnik	1
2	Kraftwerke	3
2.1	Energieformen	3
2.2	Wärme- kraftwerke	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
3	Netze	51
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
4	Schaltanlagen	185
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
5	Netzschutz	261
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

6	Personenschutz	321
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
7	Kompensationsanlagen	359
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
	Bildquellennachweis	381
	Literatur	383
	Normen	385
	Stichwortverzeichnis	389

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.

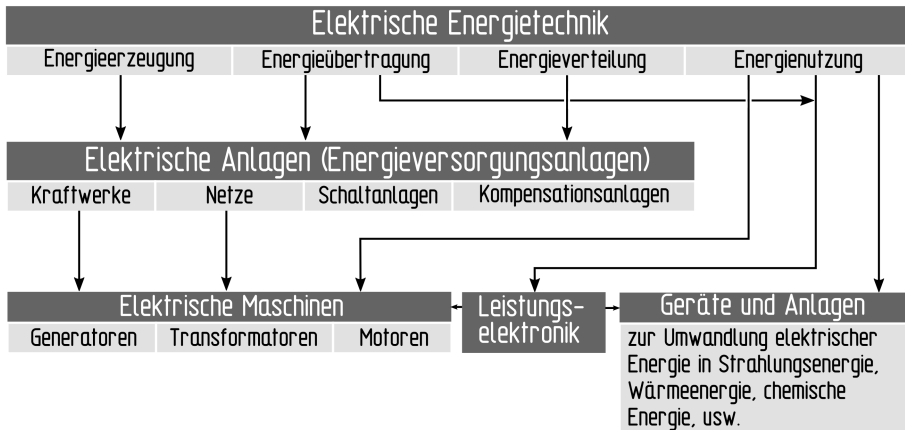


Bild 1.1 Übersicht über die elektrische Anlagentechnik

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 Ausbauformen 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

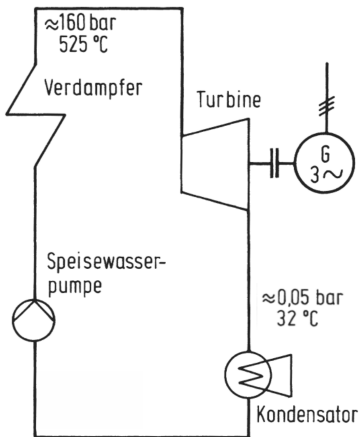


Bild 2.1
Prinzipschaltplan eines Dampfkraftwerkes

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.

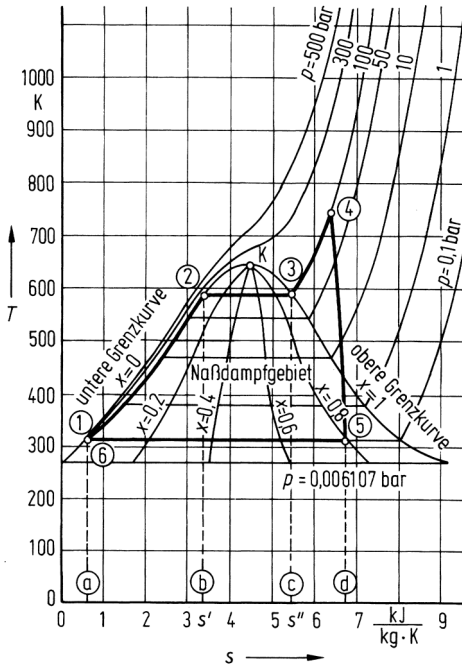
Als spezifische Entropie wird das Verhältnis der Wärmemenge Q zur Temperatur T je kg eines Arbeitsstoffes bezeichnet. So hat z.B. bei einem Druck von 1 bar und einer Temperatur von 373 K das Wasser ($x = 0$) eine spezifische Entropie von $1,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$. Durch Zuführung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

**Bild 2.2**

T,s-Diagramm des idealen Wasser-Dampf-Kreisprozesses bei einem Verdampferdruck von 100 bar

- Bei $x = 0$ liegt nur Flüssigkeit vor.
- Bei $x = 1$ liegt nur Dampf vor.
- Bei $0 < x < 1$ liegt Nassdampf vor, das heißt, ein Teil des Wassers ist flüssig, der restliche Teil ist dampfförmig.

das Gebiet des überhitzten Dampfes. Die Kurven für $0 < x < 1$ geben den Anteil des Dampfes im Nassdampfgebiet an.

Wie aus dem T,s-Diagramm hervorgeht, nimmt die Siedetemperatur des Wassers mit steigendem Druck zu. Die Wärmemenge, die notwendig ist, um das Wasser zu verdampfen, nimmt mit steigendem Druck ab (Abstand zwischen der unteren und oberen Grenzkurve bei konstantem Druck und konstanter Temperatur). Im kritischen Punkt K wird die Verdampfungswärme Null.



K ... Kritischer Punkt für Wasser

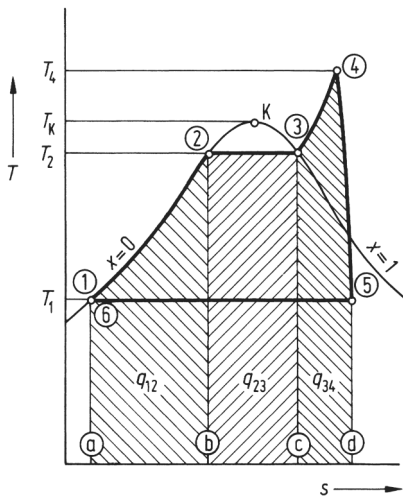
- Kritische Temperatur: $T_k = 647,3 \text{ K}$
- Kritischer Druck: $p_k = 221,2 \text{ bar}$

Zur Erklärung des T,s-Diagramms sollen folgende Verhältnisse im Verdampfer angenommen werden:

Druck im Verdampfer	$p = 100 \text{ bar}$
Temperatur des Speisewassers	$T_1 = 319 \text{ K}$
Endtemperatur des überhitzten Dampfes	$T_4 = 740 \text{ K}$

Damit lassen sich Temperatur, Druck und spezifische Entropie des Kreisprozesses aus dem T,s-Diagramm direkt ablesen:

(1)	Das Wasser liegt ausschließlich als Flüssigkeit vor ($T_1 = 319\text{K}$; $p_1 = 100\text{bar}$).
(1)-(2)	Das Wasser wird bis zum Siedepunkt erwärmt ($T_2 = 584\text{K}$; $p_2 = 100\text{bar}$).
(2)-(3)	Das Wasser wird verdampft ($T_3 = 584\text{K}$; $p_3 = 100\text{bar}$).
(3)-(4)	Der Dampf von 100bar wird auf $T_4 = 740\text{K}$ überhitzt.
(4)-(5)	Der Dampf wird auf $p_5 = 0,1\text{bar}$ bei annähernd gleichbleibender Entropie entspannt. Dabei sinkt die Dampftemperatur auf $T_5 = 319\text{K}$. Der Dampf liegt jetzt als Nassdampf vor ($x = 0,8$).
(5)-(6)	Der Dampf wird bei konstanter Temperatur von 319K und konstantem Druck von 0,1bar verflüssigt (kondensiert).
(6)-(1)	Der Wasserdruck wird von $p_6 = 0,1\text{bar}$ auf den Verdampferdruck von $p_1 = 100\text{bar}$ erhöht. Hierbei erfolgt eine geringfügige Temperaturerhöhung ($\Delta T < 1\text{K}$), die vernachlässigt werden kann.

**Bild 2.3**

Umgesetzte Wärmemengen beim Clausius-Rankine-Kreisprozess

Die große technische Bedeutung des T,s-Diagramms liegt in der anschaulichen Darstellung der umgesetzten spezifischen Wärmemengen als Flächen unter der Kurve einer Zustandsänderung. Damit lassen sich die dem Prozess zugeführte Wärme, die abgeführte Wärme und die gewinnbare mechanische Arbeit (Wärmewert der geleisteten Arbeit) direkt als Flächen ablesen (Bild 2.3).

Fläche 1-2-b-a:	Zugeführte Wärme q_{12} bis zum Siedepunkt
Fläche 2-3-c-b:	Zugeführte Verdampfungswärme q_{23}
Fläche 3-4-d-c:	Zugeführte Überhitzungswärme q_{34}
Fläche 5-d-a-6:	Abgeführte Kondensationswärme q_{56}
Fläche 1-2-3-4-5:	Gewinnbare mechanische Arbeit w_{45}

Vergleicht man die Flächen miteinander, so erkennt man, dass wesentlich mehr Wärme zugeführt wird, als mechanische Arbeit gewonnen werden kann.



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.

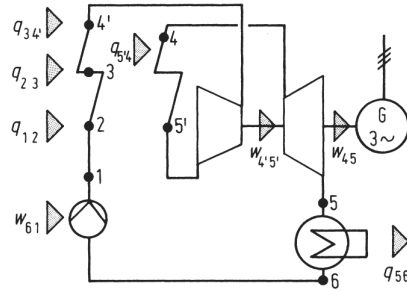
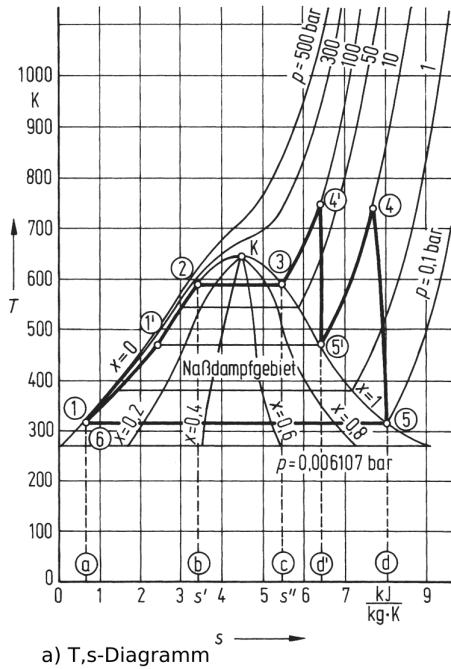


Bild 2.4 Dampfkraftwerksprozess mit Zwischenüberhitzung

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:

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

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

$$w_{61} = 0 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

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

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

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

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



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

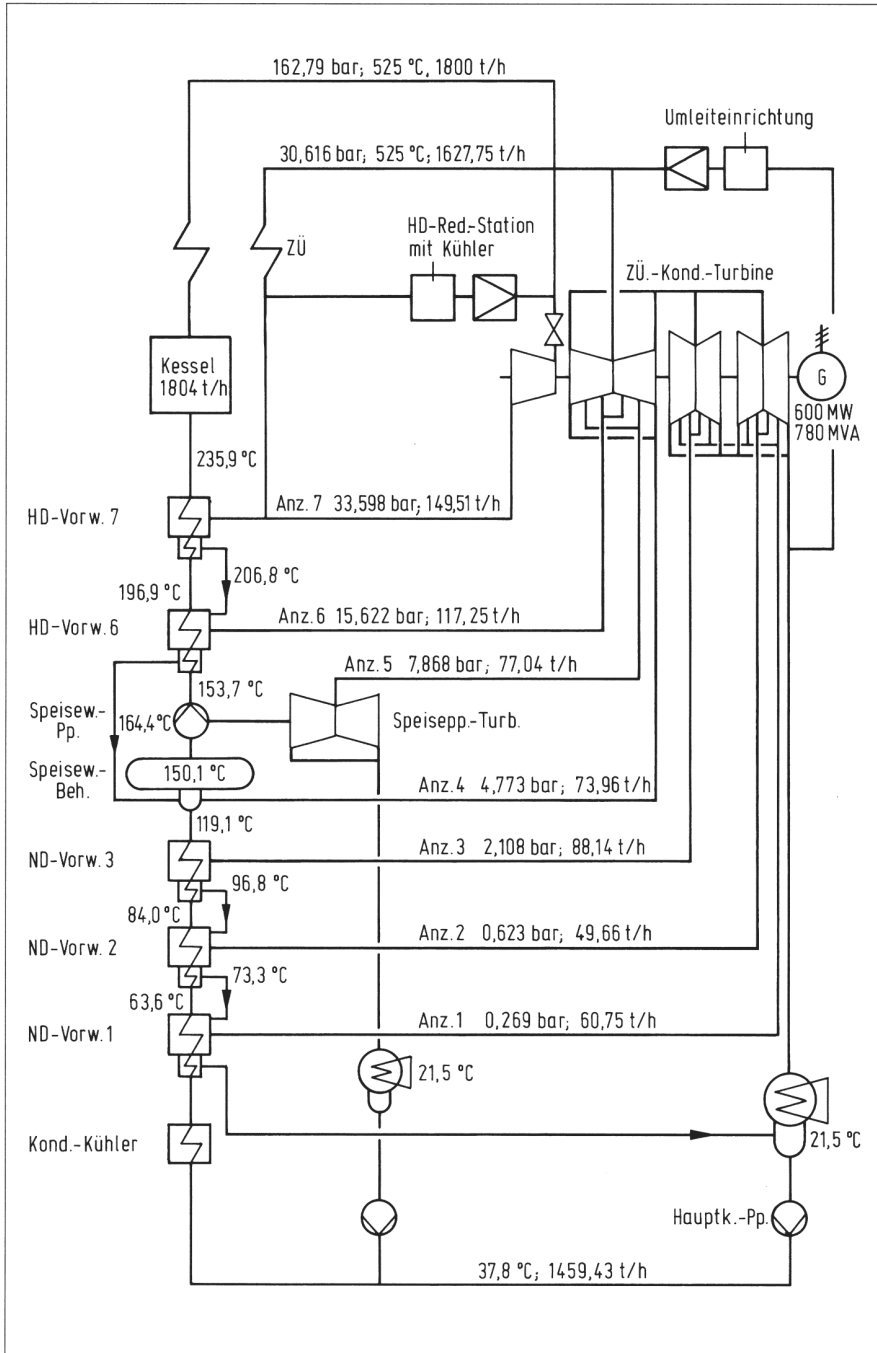


Bild 2.5 Wärmeschaltbild 600 MW-Block des Braunkohle-Kraftwerkes Neurath

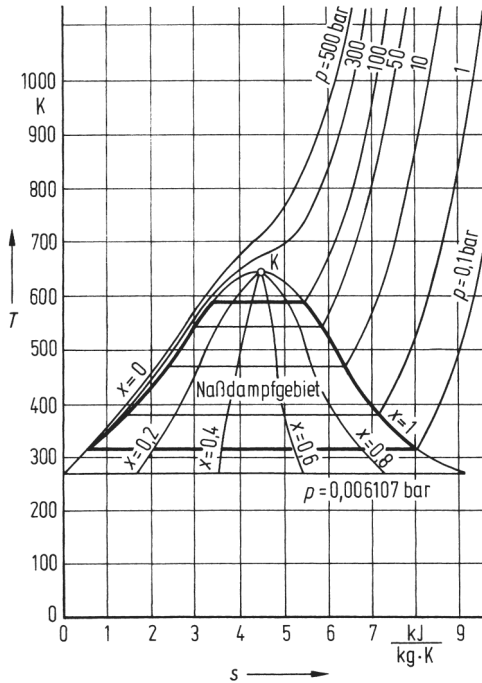


Bild 2.6
T,s-Diagramm für Wasserdampf

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.

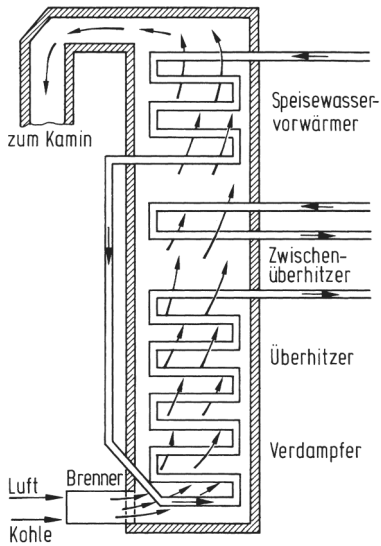
2.2.3.2 Turbine

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 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