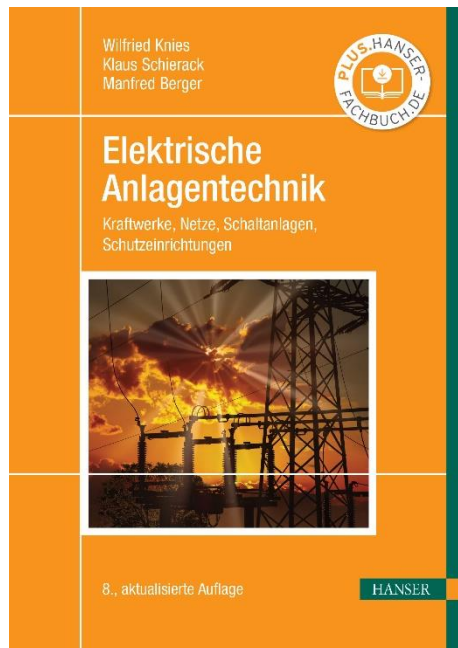


HANSER



Leseprobe

zu

Elektrische Anlagentechnik

von Wilfried Knies, Klaus Schierack und Manfred Berger

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

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

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446477155>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

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.

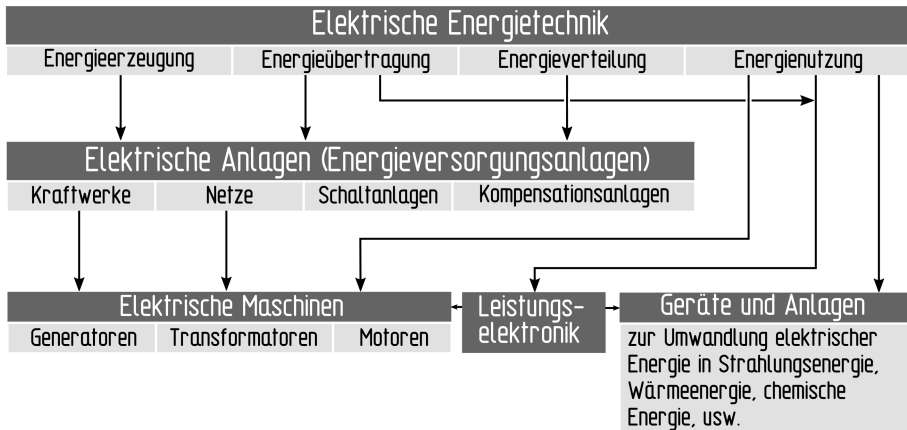


Bild 1.1 Übersicht über die elektrische Anlagentechnik

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 Ausbaufornen 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

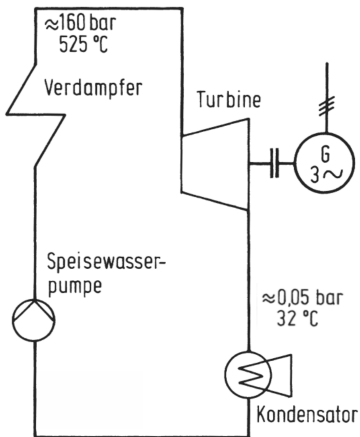


Bild 2.1
Prinzipschaltplan eines Dampfkraftwerkes

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.

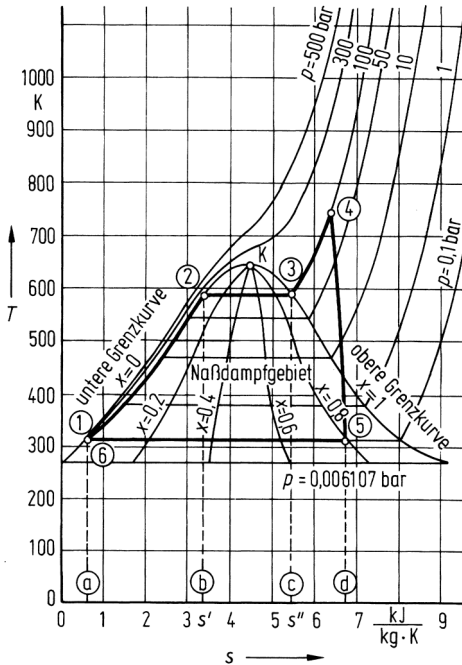
Als spezifische Entropie wird das Verhältnis der Wärmemenge Q zur Temperatur T je kg eines Arbeitsstoffes bezeichnet. So hat z.B. bei einem Druck von 1 bar und einer Temperatur von 373 K das Wasser ($x = 0$) eine spezifische Entropie von $1,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$. Durch Zuführung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



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.

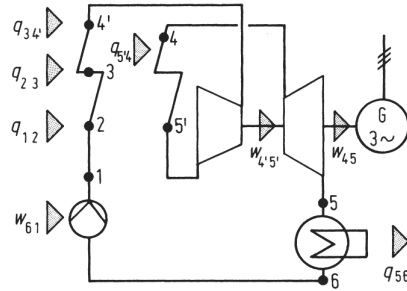
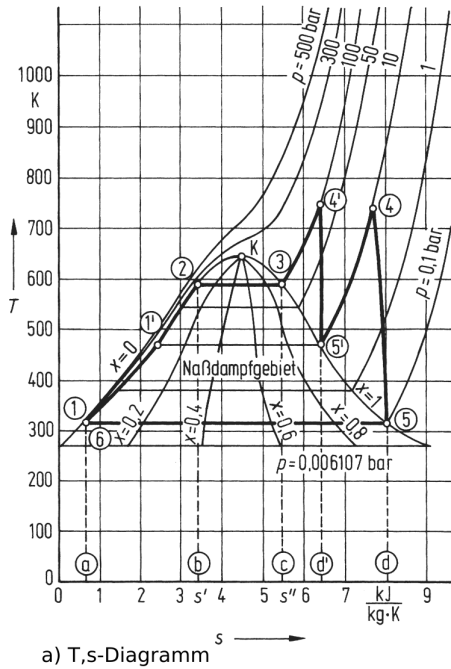


Bild 2.4 Dampfkraftwerksprozess mit Zwischenüberhitzung

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.

Stichwortverzeichnis

A

Abdampf 4, 8, 23
Ablaufkühlung 19
Ableitblech 205
Abschaltbedingung 81, 339, 345
Abschaltzeit 336, 340, 345
Abspannmast 63
Abstandhalter 63
Äquipotentiallinien 353
Aktive Teile 321, 328
Anpassung 125
Anschlussbedingung 96
Arbeit, gewinnbare mechanische 7
Ausbreitungswiderstand 352, 355
Ausgleichsspannung 251
Ausgleichstrom 136
Ausgleichsvorgang 132, 136
Auslösecharakteristik 221
Auslöser
– Arbeitsstrom- 229
– Bimetall- 221
– elektromagnetisch 221
– Kurzschluss- 221, 229
– thermisch 221, 229
– Überlast- 229
– Überstrom- 228
– Unterspannungs- 229
Auslösestrom 214
Auslösezeit 201, 221
Ausschaltwechselstrom 142
Aussetzbetrieb 276

B

Backup-Schutz 234
Banderder 355
Basisschutz 322
Baustromverteiler 239
Beanspruchung, thermische 79

Beiwert 282
Belastungsgrad 68
Bemessungs-
– Belastungsfaktor 241
– Betriebsstrom 225, 231
– Dauerstrom 225, 230
– Differenzstrom 340
– Kurzschluss-Ausschaltvermögen 226
– Kurzschluss-Einschaltvermögen 226
– Kurzschlussstrom, bedingt 233, 236
– Kurzzeitstrom 230, 236
– Kurzzeitstromdichte 282
– Stromregel 278
Bemessungswert 191, 225, 247
Berühren
– direkt 322
– indirekt 295, 322
Berührungsspannung 326, 330, 344
Betriebsart 267, 276
Betriebserder 59
Betriebserdung 348
Betriebsimpedanz 154
Betriebskapazität 89–94
Betriebsklasse 210, 218, 236
Betriebsmittel, Ersatzschaltbild 154
Betriebstemperatur 80
Bewegungsverzug 195
Bezugserde 332, 352
Blasspule 206
Blindleistungskompensation 359, 371
Blindwiderstand
– induktiver 99
– kapazitiver 93
Blitzschutzerdung 66
Brennspannung 198
Bündelleiter 63

D

Dämpfungswiderstand 194
 Dampferzeuger 8, 11, 15, 18, 24, 29
 Dampfgehalt 5, 8
 Dampfkraftanlage 5–11, 30
 Dauerbelastbarkeit 94
 Dauerkurzschlussstrom 135–142, 168
 Doppelerdkurzschluss 142
 Drehstromfreileitung 89
 Drehstromkabel 74, 84, 90, 106
 Druckluftschalter 203, 246
 Druckwasserreaktor 28–30
 Durchlassenergie 229
 Durchlassstrom 204, 210, 228
 – -Kennlinie 213
 Durchlaufkühlung 19

E

Eigenbedarfsfaktor 16, 38
 Eigenfrequenz 251
 Eigenzeit 201
 Einsatzsteuerung 45, 48
 Einschaltstrom 193, 222
 Einschaltvorgang 131, 192, 226
 Einschwingspannung 207, 251
 Einseilleiter 63
 Elektrische Anlagen 23, 25
 Elektrische Energie 3
 Elektrofilter 18
 Endmast 63
 Endtemperatur 272, 277
 – Kurzschluss- 281
 Endübertemperatur 274
 Energie
 – erneuerbare 32
 – kinetische 33, 40
 – potentielle 32, 33, 36
 – Primär 3, 32, 40, 45
 – Primär- 21
 – regenerative 32
 – Sekundär- 4
 – Wärme- 4, 14, 28, 29
 Energiebegrenzungsklasse 223
 Energieformen 3
 Entladewiderstand 193
 Entropie, spezifische 5
 Erder 348–356
 Erdkapazität 88, 328
 Erdkurzschluss 142, 176, 346
 Erdschluss 143, 329, 346
 Erdungsanlage 348–356
 Erdungsleitung 349, 355

Erdungsspannung 352
 Erdungsstrom 352
 Erdungswiderstand 332, 339, 350
 Erdwiderstand, spezifisch 350
 Ersatzmotor 159
 Ersatzradius 87
 Ersatzspannungsquelle 156, 172

F

Fallhöhe 34, 38
 Fehlerschutz 322
 Fehlerspannung 331–348
 Fehlerstromkreis 328, 331, 335
 Fehlerstromschutzeinrichtung 323, 337, 345
 Fernheizung 21
 Fernleitung 119
 Fernwärmeversorgung 22
 Festigkeit
 – mechanische 63, 79, 143
 – thermische 232
 Festkompensation 370
 Filterkreis 378
 Flüssigkeitsschalter 203
 Francis-Turbine 34
 Freiauslösung 221
 Freileitung 61–66, 89
 Freiluftschaltanlage 248, 257
 Fundamenterder 341, 349, 355
 Funktionsklasse 218

G

Gebrauchskategorie 227, 231
 Gegendruckbetrieb 23
 Gegenimpedanz 162
 Gegensystem 147–152
 Generatorkühlung 24
 Generatorspannung 23
 Gleichstromwiderstand 83, 93
 Gleichzeitigkeitsfaktor 118
 Grenzbelastungskurve 284, 288, 295
 Grenzkurve, T,s-Diagramm 5
 Grenzlänge 295
 Grenztemperatur 242
 Grundlast 35, 46
 Grundlastkraftwerk 46
 Gruppenkompensation 363, 369
 Gusseisenverteiler 239
 Gürtelkabel 73

H

Hängeisolator 62, 66
 Halbkugelder 351

Hartgasschalter 205
Hauptkondensatpumpe 11, 14
Hauptpotentialausgleich 341, 344, 347
Hauptverteiler 186
Heizkraftwerk 22
Heizwert 16
Herzkammerflimmern 324, 332
HH-Sicherung 300, 314
Hochdruckkraftwerk 34
Hochspannungsnetz 55
Höchstspannungsnetz 55
Hüllrohr 28

I

$I^2 \cdot t$ -Wert 215, 223, 233
Induktivität 86–88
Induktivitätsbelag 86, 93
Innenraumschaltanlage 186, 255
Installationsverteiler 239
Isolationsüberwachungseinrichtung 335
Isolator 61, 65
Isolierstoffverteiler 239
IT-Netzsystem 61, 332

J

Jahresbenutzungsdauer 37, 42, 46
Joule-Integral 215

K

Kabel 67–77
Kabelpritsche 270
Kabelwanne 271
Kapazität 88–95
Kapazitätsbelag 91
Kaplan-Turbine 34
Kaskadenschaltung 233
Kernnotkühlsystem 30
Kernreaktor, Leistungsregelung 29
Kettenreaktion 29
Körperimpedanz 326, 330
Körperschluss 331–345
Körperstrom 81, 324, 334
Körperwiderstand 326, 332
Kompaktstation 256
Kompensation 359–379
Kompensationsblindleistung 362, 366
Kompensatoren 361
Kondensationswärme 7, 14, 23
Kondensator 4, 14, 19
– elektrisch 361–379
– verdrosselt 377
Koppelkapazität 90

Korona 63
Kraft-Wärme-Kopplung 21
Kraftwerke 3–48
– Einsatz 45–48
– elektrische Anlage 23
– Grundlast- 35, 46
– Hochdruck- 34
– Kern- 23, 28–32
– Mitteldruck- 34
– Mittellast- 46
– Niederdruck- 34
– Photovoltaische 41–44
– Spitzenlast- 46
– Übersichtsschaltplan 25
– Wasser- 33–39
– Wind- 39–40
– Wärme- 4–32
Kraftwerksblock 15, 25
Kraftwerkswirkungsgrad 15, 21, 31
Kreisfrequenz 86
Kreislaufkühlung 19
Kreisprozess 5–11
Kritische Temperatur 6
Kritischer Druck 6
Kritischer Punkt 6
Kurzschluss 130–182, 343
– dreipolig 142, 168
– einpolig 142, 176
– Ersatzschaltbild 134, 154
– generatorfern 135, 142
– generatornah 140
– zweipolig 142, 175
Kurzschlussarten 142
Kurzschlussausschaltvermögen 226
Kurzschlussbelastbarkeit 282
Kurzschlussdauer 280–288
Kurzschlusseinschaltvermögen 226
Kurzschlussfestigkeit 143
Kurzschlussimpedanz 178
Kurzschlussleistung 154
Kurzschlussschutz 286–299
Kurzschlussspannung 158
Kurzschlussstrom, zu erwartender 130
Kurzschlussstromverlauf 134–145
Kurzschlussstemperatur 280, 287
Kurzschlussverluste 158
Kurzschlusswechselstrom, Anfangs- 140, 156
Kurzschlusswinkel 138
Kurzzeitbetrieb 276, 298
Kurzzeitstrom 230
Kurzzeitstromdichte 282, 285
Kühlturm 19–23

Kühlturmtasse 20
 Kühlwasserbedarf 14

L

Ladeleistung 92
 Ladestrom 91
 Ladestromdrossel 127
 Lastmoment 108
 Laufrad 13, 33
 Laufschaukeln 13
 Laufwasserkraftwerk 35, 46
 Lebensdauer, Schaltgeräte 231
 Leerlaufblindleistung 365–371
 Leistung
 – natürliche 96, 128
 Leistungsdichte 33, 42
 Leistungsfaktor 360, 366, 370
 Leistungsreserve 45
 Leistungsschalter
 – Auslösekennlinie 227
 – Auslöser 224
 – Kenngrößen 225
 – Selektivität 227
 Leitertemperatur 80
 Leiterwiderstand 83
 Leitfähigkeit 83
 Leitrad 13
 Leitschaukeln 13
 Leitung
 – Ersatzschaltbild 93
 Leitungsbemessung 79
 Leitungskonstanten 79, 93
 Leitungsschutzschalter 207, 219–223
 – Energiebegrenzungsklasse 223
 – Schaltvermögen 223
 Leitungsschutzsicherung 217
 Lichtbogen- 194–210, 220
 – Aufteilung 207
 – Dauer 201
 – Entwicklungszeit 201
 – Hysterese 202
 – Kammer 206, 220
 – Kennlinie 198
 – Löschung 197, 207, 246
 – Spannung 199–210, 220
 – Temperatur 199
 – Widerstand 204
 Lichtbogenschutzarmatur 66
 Löschblech 206, 220
 Löschmittel 203
 Löschespannung 201
 Loslaßgrenze 325, 330

M

Maschennetz 56
 Maschinentransformator 24
 Massekabel 69
 Mastbilder 62
 Maststation 256
 Maximum-Power-Point 43
 Mindestkurzschlussstrom 288, 293, 295
 Mitimpedanz 154, 163
 Mitsystem 147, 167, 178
 Mitteldruckkraftwerk 37
 Mittellast 46
 Mittellastkraftwerk 46
 Mittelspannungsanlage 2
 Mittelspannungsnetz 55, 97
 Moderator 28
 Motorimpedanz 159

N

Nachkühlsystem 30
 Nassdampf 5
 Nasskühlturm 19
 Nennwert 191, 223, 247
 Netz
 – -Verteilungssysteme 59
 – unvermascht 55
 – vermascht 56
 Netzimpedanz 154
 Netzurückwirkung 373, 376
 Netzschutz 261–316
 Netzspannungen 53
 Netzstruktur 54
 Netzsystem 59, 81
 Neutralleiter 59, 335, 341
 NH-Sicherung 210, 217
 Nichtauslösestrom 214, 221
 Niederdruckkraftwerk 34
 Niederspannungsanlage 2
 Niederspannungsnetz 55
 Normspannungen 55
 Nullimpedanz
 – Leitung 164
 – Transformator 166
 Nullpunktlöscher 202, 228
 Nullsystem 150, 165, 177
 Nutzungsgrad 279

O

Oberflächenerder 349
 Oberschwingung 371–379
 Oberwasser 34, 37
 Öffnungsverzug 201, 220, 233

Ölkabel 71, 76
Ortsnetz 54, 72, 117
Ortsnetzstation 256

P

Pelton-Turbine 34
PEN-Leiter 59, 342–348
Personenschutz 321–348
Phasenanschnittsteuerung 371
Photovoltaik 41
Polfaktor 254
Potentialausgleich 322, 336, 343
Potentialfeld 353
Potentialsteuerung 354
Prelldauer 195
Projektierung
– Leitungen 79
– NS-Schaltanlagen 239
Prüfdauer 214
Prüfstrom 221

R

Radialfeldkabel 74, 91
Rauchgasentschwefelung 17
Rauchgasentstickung 18
Rauchgasreinigung 17
Reaktorarten 28
Reaktorsicherheit 30
Reduktionsfaktor 270, 298
Reflexion 120, 126
Relativer Fehler 104
Resonanz 373–377
Resonanzfrequenz 375, 376, 378
Ringerder 349, 355
Ringleitung 113–116
– Tiefpunkt 115
Ringnetz 56
Rückzündung 250
Rundsteueranlage 378

S

Sammelschienenbemessungsstrom 241
Saugkreis 377, 378
Schaltanlage 185–257
– Freiluft- 186, 245, 257
– Innenraum- 186, 256
Schalter
– Lasttrenn- 236, 247
– Motor- 190, 232
– SF₆- 208, 246
– Trenn- 236, 247

Schaltgeräte, strombegrenzend 204, 210, 218,
232
Schaltgerätekombination 233
Schaltkammer 205
Schaltkombination 233
Schaltlichtbogen 196, 203
Schaltschloss 221
Schaltspiel 231, 237
Schaltstück 190–208
Schaltwagen 255
Schaltzelle 255
Schaltüberspannung 189, 247
Schlaganker 220
Schleifenimpedanz 295
Schließverzug 195
Schließzeit 196
Schmelzsicherung 209–219
Schmelzzeit 210
Schmelzzeitkennlinie 211
Schrittspannung 353
Schutzbereich 67
Schutzerdung 338, 348
Schutzerdungswiderstand 339
Schutzisolierung 322
Schutzleiter 59, 71
Schutztrennung 322
Schwachlastzeit 37
Selbsterregung 365, 369
Selbstschalter 219, 224
Selektivität 227, 299–317
Sicherung 209–219
– Betriebsklasse 218
– Funktionsklasse 218
– Teilbereich- 219
Siedepunkt 7
Skin-Effekt 83
Solargenerator 42
Spaltprodukt 29
Spannungsabfall 55, 96–119
– induktiver 93, 99
– Längs- 100
– Quer- 100
– relativer 101–104
– Wirk- 93, 99
– zulässiger 97
Spannungsänderung 96
Spannungsfaktor 157, 168, 179
Spannungstrichter 353, 356
Spannweite, Freileitung 61
Speisewasserbehälter 11, 14
Speisewasserpumpe 15
Speisewasservorwärmung 10

Spezifische Wärmemenge 7
 Spitzenlast 46
 Spitzenlastkraftwerk 46
 Staberder 349, 355
 Stahlblechverteiler 239
 Standortübergangswiderstand 328
 Starkstromkabel 67–70
 – Aufbau 69
 – Auswahlkriterien 67
 – Bauartbezeichnung 70
 – Durchschlag 73
 – Glimmentladung 73
 – Isolierung 72–77
 – Kurzzeichen 70
 – Leiterglättung 76
 – Leitschicht 74
 – Querschnittsformen 69
 – Schutzmantel 69
 – Typenbezeichnung 70
 Stationärer Zustand, Strom 132
 Steilheit, Einschwingspannung 253
 Steuerblindleistung 372
 Steuererder 354
 Steuerstab 29
 Stoßfaktor 138
 Stoßkurzschlussstrom 138, 141
 Strahlennetz 55
 Strahlungsdichte 42
 Strombelastbarkeit 349
 Stromrichter 371, 377
 Stromselektivität 307
 Stromüberhöhung 376
 Stummelnetz 58
 Stützenisolator 66
 Symmetrische Komponenten 146
 – Ersatzschaltbild 177

T

T,s-Diagramm 6–11
 Tageslastspiel 68
 Temperaturbeiwert 83
 Thermische Beanspruchung 80
 Thermischer Wirkungsgrad 16
 Tiefenerder 349
 Tiefpunkt 114
 TN-Netzsystem 59
 Tonfrequenz-Rundsteueranlage 378
 Torstrom 301
 Tragmast 63
 Transformatorimpedanz 158
 Trenner 190, 231, 245, 256
 Trockenkühlturm 21

TT-Netzsystem 60, 338
 Turbine
 – doppelflutig 14
 – einflutig 14
 – Hochdruckteil 8, 11
 – Mitteldruckteil 8, 14
 – Niederdruckteil 8, 14, 23

U

Übergangswiderstand 171, 343
 Überhitzer 11
 Überhitzungswärme 7
 Überkompensation 363, 369
 Überlastschutz 277, 290
 Überschwingsfaktor 253
 Übersichtsschaltplan 242
 Überspannung 194, 249
 Überstrom, prospektiv 210
 Übertragungswirkungsgrad 52
 Umspannanlage 186, 257
 Unterverteiler 186
 Unterwasser 34, 37
 Uran 28

V

Vakuumschalter 197, 203, 246
 Verdampfer 4, 8
 Verdampfungswärme 5, 7
 Verlegeart 267–271
 Verlustleistung 52, 79, 86, 105, 106
 – relative 105
 Vermaschung 55
 Verschiebungsblindleistung 372, 377
 Verzögerungszeit 309

W

Wärmeenergie 281
 Wärmefluss 264
 Wärmekapazität 273, 282
 Wärmemenge 5
 Wärmeschaltbild 11
 Wärmespannung 263
 Wärmewiderstand 263–267, 274
 Warmwiderstand 83
 Wasserturbine 33
 Watt peak 43
 Wechselstromdoppelleitung 86
 Wellenwiderstand 125, 127
 Widerstandsbelag 83, 93, 97
 Wiedereinschaltung, automatische 248
 Wiederkehrspannung 254
 Windgeschwindigkeit 40

Windkraftwerk 39
Wirbelströme 83
Wirklast 372
Wirkspannungsabfall 93, 99
Wirkungsgrad 52, 106
– Kraftwerks- 15
– thermischer 9–11
– Übertragungs- 52
Wirkwiderstand 83, 93
Wirkwiderstandsbelag 84, 93, 97, 162

Z

Zeitkonstante 134, 141
– thermisch 274, 277
Zeitselektivität 308
Zentralkompensation 363, 370
Zündspannung 197, 202, 208
Zusatztransformator 97
Zusatzwiderstand 83
Zwischenüberhitzer 8, 14
Zwischenüberhitzung 8