



Bibliothek des technischen Wissens

Fachwissen Betriebs- und Antriebstechnik

Fachwissen der Elektroniker/in für Betriebstechnik sowie für Maschinen- und Antriebstechnik

7. Auflage, erweiterte und überarbeitete Auflage

VERLAG EUROPA-LEHRMITTEL · Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG
Düsselberger Straße 23 · 42781 Haan-Gruiten

Europa-Nr.: 50015

Autoren von Fachwissen Betriebs- und Antriebstechnik

Hartmut Fritsche	Dipl.-Ing.	Massen
Gregor D. Häberle	Dr.-Ing.	Tettnang
Heinz O. Häberle	Dipl.-Gewerbelehrer, VDE	Kressbronn
Siegfried Schmitt	staatl. geprüfter Techniker, Techn. Oberlehrer	Bad Bergzabern

Bildbearbeitung:

Zeichenbüro des Verlags Europa-Lehrmittel, 73760 Ostfildern

Diesem Buch wurden die neuesten Ausgaben der DIN-Blätter und der VDE-Bestimmungen zugrunde gelegt. Verbindlich sind jedoch nur die DIN-Blätter und VDE-Bestimmungen selbst.

Die DIN-Blätter können von der Beuth-Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, und Kamekestraße 2-8, 50672 Köln, bezogen werden. Die VDE-Bestimmungen sind bei der VDE-Verlag GmbH, Bismarckstraße 33, 10625 Berlin, erhältlich.

7. Auflage 2015
Druck 5 4 3 2 1

Alle Drucke derselben Auflage sind parallel einsetzbar, da sie bis auf die Korrektur von Druckfehlern untereinander unverändert sind.

ISBN 978-3-8085-5007-6

Umschlaggestaltung: braunwerbeagentur, 42477 Radevormwald
unter Verwendung eines Fotos der Firma Siemens AG und eines Autorenphotos im Umspannwerk der EnBW Energie Baden-Württemberg AG

Alle Rechte vorbehalten. Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der gesetzlich geregelten Fälle muss vom Verlag schriftlich genehmigt werden.

© 2015 by Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, Vollmer GmbH & Co. KG, 42781 Haan-Gruiten
<http://www.europa-lehrmittel.de>

Satz: rkt, 42799 Leichlingen, www.rktypo.com
Druck: Konrad Tritsch Print und digitale Medien GmbH, 97199 Ochsenfurt

Vorwort zur 7. Auflage

Angesichts der zu erwartenden Bedeutungszunahme der Elektrotechnik, man denke an Elektromobile und Netz-Herausforderungen wegen erneuerbarer Energien, wurde das Buch vor allem in Richtung der für die Energieübertragung relevanten technischen Systeme erweitert. Die Hauptabschnitte enthalten jetzt:

- 1 Grundlagen** (Grundgrößen, Schaltungen von Zweipolen, Bezugspfeile),
- 2 Elektrisches Feld** (Feldgrößen, Kapazität, kapazitive Blindleistung),
- 3 Magnetisches Feld** (Feldgrößen, induktiver Blindwiderstand, Grundlagen des Transformators),
- 4 Versorgung mit elektrischer Energie** (Wärmekraftwerke, regenerative Stromerzeugung, Stromtransport, Spannungsebenen, Umspannwerke),
- 5 Verhalten von Transformatoren** (idealer Transformator, realer Transformator, Wirkungsgrad),
- 6 Transformatoren im Netz** (Anschlusskennzeichnung, Kleintransformatoren, Messwandler, Einphasentransformatoren, Drehstromtransformatoren, Transformatoren für mehr als drei Phasen),
- 7 Drehende elektrische Maschinen** (Betriebsarten, Bauformen, Schutzarten, Grundgleichungen),
- 8 Maschinen mit bewegtem Magnetfeld** (Synchrongenerator, Synchronmotor, Gleichstrommotoren mit Magnetläufer, Asynchronmaschinen, Linearantriebe, Wechselstromwicklungen),
- 9 Stromwendermaschinen** (Gleichstrommaschinen, Einphasen-Reihenschlussmotor, Repulsionsmotor, Kleinmotoren mit Kommutierung, Getriebe für Kleinmotoren),
- 10 Umformer** (Motorgenerator, asynchrone Frequenzumformer, sonstige Umformer),
- 11 Antriebstechnik** (Auswahl von Elektromotoren, Steuerung und Regelung, GRAFCET, Kleinsteuerungen, Speicherprogrammierbare Steuerungen, Komponenten für Motorsteuerung, Motorschutz, Stromrichter),
- 12 Übertragungsnetze** (Niederspannungsnetze, Niederspannungs-Freileitungen, Mittelspannungsnetz, 110-kV-Netz, Höchstspannungsnetze, HGÜ, Beeinflussung der Netze, Oberschwingungen, Kompensation der Oberschwingungen, Regelung der Netzspannung),
- 13 Maßnahmen für die Betriebssicherheit** (Arbeiten in elektrischen Anlagen, Schutzmaßnahmen, Elektromagnetische Verträglichkeit EMV, SSV-Systeme, Umweltbelastungen),
- 14 Planung von elektrischen Anlagen** (Projektmanagement, Projektieren einer Gebäudeinstallation, Projektieren einer Maschinenausrüstung),
- 15 Internet** (Internet-Kommunikation, Gefahren durch das Internet),
- 16 Vertiefende Bereiche** (Theorie der Asynchronmaschine, weitere Drehstromwicklungen).

Neu aufgenommen wurden Gleichstrom-Schalten von Kondensatoren, Zeitkonstante, Messen von Oberschwingungen, Leitungsberechnung, Gleichstrom-Schalten von Spulen, allgemeine Schützschaltung mit Kleinsteuerung, Messen mit Zangenstromwendlern, Spannungsfall an Blindwiderstand, thermische Klassen von Isolierstoffen, Funktion von Klimageräten, Klimatisierung von Schaltschränken, Zündstrahlmotor, Kleinkraftwerk mit Gasmotor, Strombelastbarkeit von Kabeln und Leitungen mit Betriebstemperatur von $\leq 90^\circ\text{C}$, Intelligente Stromnetze (Smart Grids), EU-Maschinenrichtlinie, Angabe der Buchseiten zu den verwendeten Normen.

Überarbeitet und erweitert wurden Windkraftwerke, regenerative thermische Stromerzeugung, Spannungsfall an Leitungen, Schutz gegen elektrischen Schlag. Bei der Überarbeitung erfolgte eine Anpassung an geänderte Normen, z. B. Leitungsabzweige mit Richtungsangabe. Allgemein ist zu beachten, dass Normen oft verschiedene Formen zulassen, z. B. in EN 61082 Stromverzweigungen mit oder ohne Punkt oder nach EN 60617-6 Wicklungen von drehenden elektrischen Maschinen mit wechselnder Lockenzahl und nach EN 60034-8 mit immer drei Locken. Beide Formen kommen in der beruflichen Praxis vor. Deshalb wurden beide Formen auch im Buch angewendet.

Ergänzt wurde das Buch durch eine dazugehörige CD/DVD mit Bildern. Dadurch wird beim gemeinsamen Lernen in der Lerngruppe die Kommunikation und die Visualisierung bei der Präsentation erleichtert, insbesondere auch bei Vorträgen durch Lernende.

In der **7. Auflage** richtet sich das Buch an alle, die sich mit den Lernfeldern der Elektroniker aus den Fachrichtungen Betriebstechnik sowie Maschinen- und Antriebstechnik auseinander zu setzen haben, nämlich Auszubildende der Berufe Elektroniker für Maschinen- und Antriebstechnik, Elektroniker für Betriebstechnik, Schüler von Berufsfachschulen und Berufskollegs entsprechender Schwerpunkte, Studierende von Fachschulen (Technikerschulen und Meisterschulen) sowie von Hochschulen und technischen Universitäten.

Autoren und Verlag danken für die wertvollen Benutzerhinweise und sind weiterhin für konstruktive Verbesserungsvorschläge dankbar. Diese können auch gerichtet sein an lektorat@europa-lehrmittel.de.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen dieses Buches	8	4.5	Stromtransport	72	
Indizes und Zeichen für Formelzeichen dieses Buches	9	4.5.1	Zweck der Spannungstransformation	72	
Internationale Formelzeichen	10	4.5.2	Spannungsebenen	72	
1	Grundlagen	4.5.3	Umspannwerke	73	
1.1	Stromstärke, Widerstand, Spannung	11	4.5.4	Leitungen und Kabel	76
1.2	Schaltungen von Zweipolen	14	4.5.5	Bemessungsstromstärke von Lasten	78
1.3	Leistung, Arbeit, Energie	16	4.5.6	Spannungsfall an Leitungen	80
1.4	Bezugspeile	19	4.5.7	Leistungsverlust in Leitungen	83
2	Elektrisches Feld	4.5.8	Strombelastbarkeit von Installations- leitungen	84	
2.1	Elektrische Ladung	22	4.5.9	Überstromschutz von Leitungen	87
2.2	Elektrische Feldstärke	23	5	Verhalten von Transformatoren	
2.3	Elektrische Flussdichte	24	5.1	Idealer Transformator	93
2.4	Kapazität	24	5.2	Realer Transformator im Leerlauf	95
2.5	Kapazitiver Blindwiderstand	24	5.3	Realer Transformator unter Last	97
2.5.1	Ladung und Stromstärke	24	5.4	Ersatzschaltungen von Transformatoren	99
2.5.2	Kondensatorstrom bei Sinusspannung	25	5.5	Zeigerdiagramm des belasteten Transformators	101
2.5.3	Kapazitive Blindleistung	26	5.6	Kurzschlussstrom und Einschaltstrom	102
2.5.4	Kondensator als Blindwiderstand	26	5.7	Wirkungsgrad und Arbeitsgrad von Transformatoren	104
2.6	Elektrisches Feld als Energiespeicher	27	5.8	Besondere Transformatoren	105
2.7	Gleichstrom-Schalten von Kondensatoren	27	5.8.1	Spartransformator	105
3	Magnetisches Feld	5.8.2	Übertrager	106	
3.1	Arten magnetischer Stoffe	29	5.8.3	Elektronischer Transformator	107
3.2	Elektrische Durchflutung	30	6	Transformatoren im Netz	
3.3	Magnetische Feldstärke	31	6.1	Anschlusskennzeichnung	108
3.4	Magnetische Flussdichte	31	6.2	Kleintransformatoren	109
3.5	Magnetischer Fluss	33	6.3	Lichtbogen-Schweißtransformatoren	114
3.6	Magnetischer Verkettungsfluss	33	6.4	Messwandler	116
3.7	Lorentzkraft	34	6.5	Einphasentransformatoren für Drehstrom	124
3.8	Induktion	35	6.5.1	V-Schaltung	124
3.9	Induktiver Blindwiderstand	39	6.5.2	Transformatorenengruppe	124
3.10	Magnetisches Feld als Energiespeicher	43	6.6	Drehstromtransformatoren	126
3.11	Gleichstrom-Schalten von Spulen	43	6.6.1	Allgemeines	126
3.12	Grundlagen des Transformators	45	6.6.2	Eisenkern	126
4	Versorgung mit elektrischer Energie	6.6.3	Wicklung	127	
4.1	Ströme in öffentlichen Netzen	48	6.6.4	Ölkessel	129
4.1.1	Stromarten für die Stromversorgung	48	6.7	Schaltungen von Drehstrom- transformatoren	130
4.1.2	Erzeugen von Drehstrom	48	6.7.1	Schaltungen der Wicklungsstränge	130
4.1.3	Spannungen beim Drehstromnetz	49	6.7.2	Schaltgruppen	132
4.1.4	Schaltungen bei Drehstrom	50	6.7.3	Parallelenschalten von Transformatoren	133
4.1.5	Leistungen bei Drehstrom	51	6.7.4	Drehtransformator	135
4.2	Grundlagen der Stromversorgung	52	6.7.5	Transformatoren für mehr als drei Phasen	136
4.3	Wärmekraftwerke	53	7	Drehende elektrische Maschinen	
4.3.1	Verbrennungskraftwerke	53	7.1	Einteilung	138
4.3.2	Kernkraftwerke (Atomkraftwerke)	56	7.2	Isolierstoffklassen	139
4.4	Regenerative Stromerzeugung	58	7.3	Betriebsarten	140
4.4.1	Wasserkraftwerke	58	7.3.1	Allgemeines	140
4.4.2	Regenerative thermische Stromerzeugung	59	7.3.2	Dauerbetrieb S1	140
4.4.3	Windkraftwerke	61	7.3.3	Kurzzeitbetrieb S2	140
4.4.4	PV-Stromerzeugung	65	7.3.4	Aussetzbetriebsarten	141
4.4.5	Stromerzeugung mit Brennstoffzellen	68	7.3.5	Ununterbrochene periodische Betriebsarten	142
4.4.6	Ausgleich schwankender Stromerzeugung	70			

7.4	Bauformen von elektrischen Maschinen	144	9.2.3	Fremderregte Gleichstrommaschine	216
7.5	Leistungsschild	145	9.2.4	Weitere Gleichstrommaschinen	217
7.6	Wartung und Prüfung	146	9.3	Ankerquerfeld	219
7.6.1	Elektrische Prüfungen	146	9.3.1	Entstehung des Ankerquerfeldes	219
7.6.2	Mechanische Prüfungen	151	9.3.2	Wendepole	220
7.7	Schutzarten	155	9.3.3	Kompensationswicklung	220
7.8	Grundgleichungen der drehenden elektrischen Maschinen	157	9.3.4	Querfeldgeneratoren	222
7.9	Anschlussbezeichnung von drehenden elektrischen Maschinen	158	9.3.5	Ankerquerfeld beim Motor	222
8	Maschinen mit bewegtem Magnetfeld		9.4	Gleichstrommaschine als Motor	223
8.1	Erzeugung eines Drehfeldes	163	9.4.1	Wirkung des Ankers	223
8.2	Drehstrommaschinen mit Magnetläufern	166	9.4.2	Kraftmoment und Anzugsstrom	224
8.2.1	Synchrongenerator	166	9.4.3	Einstellen der Umdrehungsfrequenz	225
8.2.2	Synchronmotoren für Drehstrom	171	9.5	Schaltungen von Gleichstrommotoren	225
8.3	Einphasenwechselstrom-Maschinen mit Magnetläufern	173	9.5.1	Fremderregter Motor	226
8.3.1	Einphasengeneratoren	173	9.5.2	Reihenschlussmotor	227
8.3.2	Synchronmotoren für Einphasenwechselstrom	173	9.6	Stromwendermotoren für Wechselstrom	228
8.4	Gleichstrommotoren mit Magnetläufern	175	9.6.1	Aufbau	228
8.4.1	Arten der Schrittmotoren	175	9.6.2	Einphasen-Reihenschlussmotor	229
8.4.2	Ansteuerschaltungen der Schrittmotoren	180	9.6.3	Repulsionsmotor	230
8.4.3	Betriebsverhalten der Schrittmotoren	180	9.6.4	Linearmotor mit Stromwender	231
8.4.4	Elektronikmotor	181	9.6.5	Stromwendermotor für Drehstrom	231
8.5	Maschinen mit Kurzschlussläufern	183	9.7	Fehler bei Stromwendermaschinen	232
8.5.1	Aufbau des Kurzschlussläufers	183	9.8	Wicklungen von Stromwendermotoren	234
8.5.2	Wirkungsweise des Asynchrongenerators	184	9.8.1	Ständerwicklungen von Gleichstrommaschinen	234
8.5.3	Wirkungsweise des Kurzschlussläufermotors	185	9.8.2	Ankerwicklung von Stromwendermaschinen	234
8.5.4	Kurzschlussläufermotoren für Einphasenwechselstrom	188	9.9	Kleinstmotoren mit Kommutierung	238
8.6	Schleifringläufermaschinen	190	9.9.1	Mechanische Kommutierung	238
8.7	Sonstige Motoren mit bewegtem Magnetfeld	193	9.9.2	Elektronische Kommutierung	239
8.7.1	Wirbelstromläufermotoren	193	9.9.3	Getriebe für Kleinstmotoren	240
8.7.2	Reluktanzmotoren	193	10	Umformer	
8.7.3	Polumschaltbare Motoren	194	10.1	Motorgenerator	241
8.7.4	Spannungsumschaltbare Motoren	196	10.2	Asynchrone Frequenzumformer	241
8.8	Linearantriebe	196	10.3	Sonstige Umformer	242
8.8.1	Linearantrieb mit drehendem Motor	196	11	Antriebstechnik	
8.8.2	Wechselstrom-Linearmotoren	197	11.1	Steuern und Regeln	243
8.8.3	Linearschrittmotoren	199	11.1.1	Steuern	243
8.8.4	Schwingankermotoren	200	11.1.2	Regeln	243
8.8.5	Piezomotoren	200	11.1.3	Schaltende Regeleinrichtungen	245
8.8.6	Gleichstrom-Linearmotoren	202	11.1.4	Stetige Regeleinrichtungen	245
8.9	Wechselstromwicklungen	203	11.1.5	Kennzeichnung der Regelstrecke	246
8.9.1	Drehstromwicklungen	203	11.1.6	Steuern und Regeln mit dem PC	247
8.9.2	Einphasenwicklungen	207	11.1.7	Regeln mit Digitalregler	248
8.9.3	Umwickeln von Wechselstromwicklungen	209	11.1.8	GRAFCET	250
8.10	Fehler bei Drehfeldmaschinen	210	11.2	Kleinsteuerungen	253
9	Stromwendermaschinen		11.2.1	Elemente von LOGO!	253
9.1	Aufbau von Gleichstrommaschinen	212	11.2.2	Bearbeiten eines LOGO!-Projektes	255
9.2	Wirkungsweise von Gleichstrommaschinen	215	11.2.3	Erweiterter Ausbau einer LOGO!	255
9.2.1	Kurvenform der induzierten Spannung	215	11.3	Speicherprogrammierbare Steuerungen	257
9.2.2	Wirkungsweise bei der Spannungs-erzeugung	216	11.3.1	SPS-Grundlagen	257
			11.3.2	Funktionen einer SPS	258
			11.3.3	Ablaufsteuerungen mit SPS	260
			11.3.4	Bussysteme für SPS	261
			11.3.5	Eingabe-Ausgabe-Einheiten	262
			11.3.6	Fehlersichere Kommunikation	263
			11.4	Komponenten für Steuerungen	265
			11.4.1	Nockenhalter	265
			11.4.2	Schütze	266
			11.4.3	Hilfsstromkreise	269

11.4.4	Halbleiterbauelemente	275	12.4	Mittelspannungsnetze	349																																																																																																																																																																																																
11.4.5	Halbleiterbaugruppen	281	12.4.1	Bemessungsspannung und Aufgaben	349																																																																																																																																																																																																
11.5	Anlassen von Drehfeldmotoren	285	12.4.2	Netzaufbau	349																																																																																																																																																																																																
11.5.1	Allgemeine Bestimmungen	285	12.4.3	Elektrische Wirkung auf die Umgebung	350																																																																																																																																																																																																
11.5.2	Anlassschaltungen für Drehstrom-Kurzschlussläufermotoren	285	12.5	Hochspannungsnetze	351																																																																																																																																																																																																
11.5.3	Einfache Schützschaltungen	287	12.5.1	Bemessungsspannung und Aufgaben	351																																																																																																																																																																																																
11.5.4	Polumschaltungen	290	12.5.2	Netzaufbau beim 110-kV-Netz	351																																																																																																																																																																																																
11.5.5	Stern-Dreieck-Schützschaltungen	292	12.5.3	Netzaufbau der Höchstspannungsnetze	353																																																																																																																																																																																																
11.5.6	Anlassschaltungen für Schleifringläufermotoren	293	12.5.4	Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung HGÜ	354																																																																																																																																																																																																
11.5.7	Allgemeine Schützschaltung	294	12.6	Erdungsanlagen	356																																																																																																																																																																																																
11.5.8	Elektronische Motorstarter	295	12.7	Beeinflussung der Netze	358																																																																																																																																																																																																
11.6	Anlassberechnung beim Schleifringläufermotor	298	12.7.1	Blindleistung	358																																																																																																																																																																																																
11.7	Bremsen von Drehstrommotoren	299	12.7.2	Oberschwingungen	361																																																																																																																																																																																																
11.7.1	Mechanisches Bremsen mit elektrischer Steuerung	299	12.7.3	Stromqualität	364																																																																																																																																																																																																
11.7.2	Elektrisches Bremsen	300	12.7.4	Kompensation von Oberschwingungen	365																																																																																																																																																																																																
11.7.3	Verlustwärme beim Anlauf und Bremsen	303	12.7.5	Regelung der Netzspannung	366																																																																																																																																																																																																
11.8	Steuerung von Stromwendermotoren	304	12.8	Bau von Hochspannungsanlagen	368																																																																																																																																																																																																
11.9	Motorschutz	308	12.8.1	Isolatoren	369																																																																																																																																																																																																
11.10	Stromrichter zur Drehzahlsteuerung	310	12.8.2	Armaturen	371																																																																																																																																																																																																
11.10.1	Drehzahlsteuerung beim Universalmotor	310	12.9	Intelligente Stromnetze (Smart Grids)	374																																																																																																																																																																																																
11.10.2	Drehzahlsteuerung beim fremderregten Gleichstrommotor	311	11.10.3	Drehzahlsteuerung mit Gleichstromsteller	313	12.10	Messen von Oberschwingungen	375	11.10.4	Umrichter	314	11.10.5	Stromzwischenkreis-Umrichter	316	11.10.6	Umrichter mit Pulsamplitudenmodulation	316	11.10.7	Umrichter mit Pulsweitenmodulation	318	11.10.8	Direktumrichter	319	11.10.9	Untersynchrone Stromrichterkaskade	320	11.10.10	Doppelt speisender Asynchrongenerator	320	11.11	Servomotoren	322	11.11.1	Anforderungen an Servomotoren	322	11.11.2	Drehstrommotoren als Servomotoren	323	11.11.3	Gleichstrommotoren als Servomotoren	327	11.12	Hybridantriebe	329	11.13	Antriebssysteme betreiben	331	11.13.1	Auftragsakquisition	331	11.13.2	Auftragsplanung	331	11.13.3	Auftragsdurchführung	332	11.13.4	Auftragskontrolle	335	12	Übertragungsnetze		12.1	Netzformen	336	12.2	Niederspannungsnetze	337	12.2.1	Netzaufbau	337	12.2.2	Niederspannungs-Freileitungen	339	12.2.3	Tragmaste	339	12.2.4	Endmaste	342	12.2.5	Abspannmaste	343	12.2.6	Abgespannte Maste	343	12.2.7	Winkelmaste	343	12.2.8	Winkeltragmaste	344	12.2.9	Sondermaste	344	12.3	Hausanschluss	345	12.3.1	Ausführung des Hausabschlusses	345	12.3.2	Bemessen der Leitungen bis zu den Stromkreisverteilern	346	13	Maßnahmen für die Betriebssicherheit		13.1	Sicherheit beim Arbeiten in elektrischen Anlagen	377	13.2	Systemformen im Niederspannungsnetz	381	13.3	Schutzmaßnahmen	383	13.3.1	Berührungsarten	383	13.3.2	Stromgefährdung	383	13.3.3	Basisschutz	384	13.3.4	Maßnahmen für zugleich Basisschutz und Fehlerschutz	384	13.3.5	Fehlerschutz	385	13.3.6	Zusätzlicher Schutz	390	13.3.7	Schutz in elektrotechnisch überwachten Anlagen	391	13.3.8	Schutzeleiter und Schutspotenzial-Ausgleichsleiter	392	13.4	Prüfungen	393	13.4.1	Schutzklassen der Betriebsmittel	393	13.4.2	Betätigungsselemente in der Nähe berührungsgefährlicher Teile	393	13.4.3	Prüfungen der Elektroinstallation	394	13.4.4	Durchführung der Prüfungen	399	13.5	Elektromagnetische Verträglichkeit EMV	401	13.6	SSV-Anlagen	408	13.7	Elektrische Ausrüstung von Maschinen	413	13.7.1	Anwendungsbereich	413	13.7.2	Begriffe	413	13.7.3	Allgemeine Anforderungen	413	13.7.4	Netzanschlüsse, Trenneinrichtung und Schalter	414	13.7.5	Schutz gegen elektrischen Schlag	415	13.7.6	Schutz der Ausrüstung	415	13.7.7	Potenzialausgleich	417	13.7.8	Steuerstromkreise	417	13.7.9	Bedienerschnittstellen	419	13.7.10	Anordnung der Schaltgeräte	419	13.7.11	Leiter, Leitungen, Kabel	419
11.10.3	Drehzahlsteuerung mit Gleichstromsteller	313	12.10	Messen von Oberschwingungen	375																																																																																																																																																																																																
11.10.4	Umrichter	314																																																																																																																																																																																																			
11.10.5	Stromzwischenkreis-Umrichter	316																																																																																																																																																																																																			
11.10.6	Umrichter mit Pulsamplitudenmodulation	316																																																																																																																																																																																																			
11.10.7	Umrichter mit Pulsweitenmodulation	318																																																																																																																																																																																																			
11.10.8	Direktumrichter	319																																																																																																																																																																																																			
11.10.9	Untersynchrone Stromrichterkaskade	320																																																																																																																																																																																																			
11.10.10	Doppelt speisender Asynchrongenerator	320																																																																																																																																																																																																			
11.11	Servomotoren	322																																																																																																																																																																																																			
11.11.1	Anforderungen an Servomotoren	322																																																																																																																																																																																																			
11.11.2	Drehstrommotoren als Servomotoren	323																																																																																																																																																																																																			
11.11.3	Gleichstrommotoren als Servomotoren	327																																																																																																																																																																																																			
11.12	Hybridantriebe	329																																																																																																																																																																																																			
11.13	Antriebssysteme betreiben	331																																																																																																																																																																																																			
11.13.1	Auftragsakquisition	331																																																																																																																																																																																																			
11.13.2	Auftragsplanung	331																																																																																																																																																																																																			
11.13.3	Auftragsdurchführung	332																																																																																																																																																																																																			
11.13.4	Auftragskontrolle	335																																																																																																																																																																																																			
12	Übertragungsnetze																																																																																																																																																																																																				
12.1	Netzformen	336																																																																																																																																																																																																			
12.2	Niederspannungsnetze	337																																																																																																																																																																																																			
12.2.1	Netzaufbau	337																																																																																																																																																																																																			
12.2.2	Niederspannungs-Freileitungen	339																																																																																																																																																																																																			
12.2.3	Tragmaste	339																																																																																																																																																																																																			
12.2.4	Endmaste	342																																																																																																																																																																																																			
12.2.5	Abspannmaste	343																																																																																																																																																																																																			
12.2.6	Abgespannte Maste	343																																																																																																																																																																																																			
12.2.7	Winkelmaste	343																																																																																																																																																																																																			
12.2.8	Winkeltragmaste	344																																																																																																																																																																																																			
12.2.9	Sondermaste	344																																																																																																																																																																																																			
12.3	Hausanschluss	345																																																																																																																																																																																																			
12.3.1	Ausführung des Hausabschlusses	345																																																																																																																																																																																																			
12.3.2	Bemessen der Leitungen bis zu den Stromkreisverteilern	346																																																																																																																																																																																																			
13	Maßnahmen für die Betriebssicherheit																																																																																																																																																																																																				
13.1	Sicherheit beim Arbeiten in elektrischen Anlagen	377																																																																																																																																																																																																			
13.2	Systemformen im Niederspannungsnetz	381																																																																																																																																																																																																			
13.3	Schutzmaßnahmen	383																																																																																																																																																																																																			
13.3.1	Berührungsarten	383																																																																																																																																																																																																			
13.3.2	Stromgefährdung	383																																																																																																																																																																																																			
13.3.3	Basisschutz	384																																																																																																																																																																																																			
13.3.4	Maßnahmen für zugleich Basisschutz und Fehlerschutz	384																																																																																																																																																																																																			
13.3.5	Fehlerschutz	385																																																																																																																																																																																																			
13.3.6	Zusätzlicher Schutz	390																																																																																																																																																																																																			
13.3.7	Schutz in elektrotechnisch überwachten Anlagen	391																																																																																																																																																																																																			
13.3.8	Schutzeleiter und Schutspotenzial-Ausgleichsleiter	392																																																																																																																																																																																																			
13.4	Prüfungen	393																																																																																																																																																																																																			
13.4.1	Schutzklassen der Betriebsmittel	393																																																																																																																																																																																																			
13.4.2	Betätigungsselemente in der Nähe berührungsgefährlicher Teile	393																																																																																																																																																																																																			
13.4.3	Prüfungen der Elektroinstallation	394																																																																																																																																																																																																			
13.4.4	Durchführung der Prüfungen	399																																																																																																																																																																																																			
13.5	Elektromagnetische Verträglichkeit EMV	401																																																																																																																																																																																																			
13.6	SSV-Anlagen	408																																																																																																																																																																																																			
13.7	Elektrische Ausrüstung von Maschinen	413																																																																																																																																																																																																			
13.7.1	Anwendungsbereich	413																																																																																																																																																																																																			
13.7.2	Begriffe	413																																																																																																																																																																																																			
13.7.3	Allgemeine Anforderungen	413																																																																																																																																																																																																			
13.7.4	Netzanschlüsse, Trenneinrichtung und Schalter	414																																																																																																																																																																																																			
13.7.5	Schutz gegen elektrischen Schlag	415																																																																																																																																																																																																			
13.7.6	Schutz der Ausrüstung	415																																																																																																																																																																																																			
13.7.7	Potenzialausgleich	417																																																																																																																																																																																																			
13.7.8	Steuerstromkreise	417																																																																																																																																																																																																			
13.7.9	Bedienerschnittstellen	419																																																																																																																																																																																																			
13.7.10	Anordnung der Schaltgeräte	419																																																																																																																																																																																																			
13.7.11	Leiter, Leitungen, Kabel	419																																																																																																																																																																																																			

13.7.12	Verdrahtungstechnik	419
13.7.13	Sonstige Anforderungen	420
13.8	Umweltbelastungen der Elektrotechnik	421

14 Planung von elektrischen Anlagen

14.1	Projektmanagement	423
14.2	Lastenheft, Pflichtenheft	423
14.3	Projektende	423
14.4	Projektieren einer Gebäudeinstallation	425
14.4.1	Planungsgrundlagen	425
14.4.2	Leitungsführung in Wohngebäuden	427
14.4.3	Kommunikationsanlagen	428
14.5	Projektieren einer Maschinen-ausrüstung	429
14.5.1	Auswahl eines Elektromotors	429
14.5.2	Stromversorgung, Schutzeinrichtungen	431
14.5.3	Steuerleitungen	432
14.5.4	Schaltungsaufbau	433
14.5.5	Weg zur sicheren Maschine	434

15 Internet

15.1	Internet-Kommunikation	438
15.2	Gefahren durch das Internet	439
15.3	Firewall-Systeme	440

16 Vertiefende Bereiche

16.1	Theorie der Asynchronmaschine	441
16.1.1	Oberschwingungen	441
16.1.2	Ersatzschaltung der Asynchronmaschine	443
16.1.3	Ortskurve	445
16.1.4	Leerlaufversuch und Kurzschlussversuch	446
16.1.5	Auswertung der Ortskurve	447
16.1.6	Rechengang beim Kreisdiagramm	449
16.1.7	Verfeinertes Kreisdiagramm	451
16.2	Weitere Dreiphasenwicklungen	454
16.2.1	Einschichtwicklungen	454
16.2.2	Zweischichtwicklungen	455
16.2.3	Polumschaltbare Wicklungen	457

17 Anhang

17.1	Größen und Einheiten	460
17.2	Wichtige Normen	462
17.3	Teile des VDE-Vorschriftenwerkes	465
17.4	Teile von VDE 0100	466
17.5	Kurzformen von Fachbegriffen	468
17.6	Literaturverzeichnis	470
17.7	Sachwortverzeichnis	471
17.7	Firmen und Dienststellen	479

Bildquellenverzeichnis

Die meisten Bilder entstammen aus dem Arbeitsumfeld der Autoren. Ergänzend hierzu haben die nachfolgend aufgeführten Unternehmen und Institutionen die bildliche Ausgestaltung unterstützt. Dabei sind für diese alle Rechte vorbehalten. Kein Teil darf ohne vorherige schriftliche Genehmigung weitergegeben, in einem Datensystem gespeichert oder in irgendeiner Form, weder elektronisch noch mechanisch, durch Fotokopie, Aufnahme noch durch andere Art übertragen werden.

Die Anschriften weiterer Firmen, die mit Bildern dieses Buch unterstützt haben, sind im Verzeichnis „Firmen und Dienststellen“ am Buchende aufgeführt.

Die Autoren danken dafür allen Beteiligten sehr herzlich.

Adaptaflex GmbH	64546 Mörfelden-Walldorf	www.adaptaflex.com	414-1
Danfoss GmbH	76073 Offenbach	www.danfoss.com	306-3
Dehn + Söhne GmbH	92306 Neumarkt	www.dehn.de	380-3
Dr. F. Faulhaber GmbH	71101 Schönaich	www.faulhaber.com	201-2, 201-4
Driescher KG	41844 Wegberg	www.driescher-wegberg.de	75-1, 75-3
Eaton Industries	53115 Bonn	www.moeller.net	268-2
EnBW AG	76131 Karlsruhe	www.enbw.com	73-1, 73-2, 73-3
Gossen Metrawatt GmbH	90449 Nürnberg	www.gossenmetrawatt.com	123-1, 396-2
Gustav Hensel GmbH	57368 Lennestadt	www.hensel-electric.de	425-2
Häberle, Verena	88069 Tettnang	—	74-3
Hager Tehalit GmbH	66440 Blieskastel	www.hager.de	345-1
Hauff-Technik GmbH	89542 Herbrechtingen	www.hauff-technik.de	346-1, 346-2
maxon motor ag	6072 Sachsel/OW Schweiz	www.maxonmotor.com	238-2, 238-3, 239-1, 240-1, 240-2, 240-3
Siemens AG	80333 München	www.siemens.com	53-2, 167-1, 249-1, 253-1, 355-1
ZF-Friedrichshafen	88046 Friedrichshafen	www.zf.com	183-3, 329-4

Es gibt sehr kleine und sehr große Transformatoren. Ihre Nennleistungen gehen von etwa 1 mVA bei Miniaturtransformatoren zum Einbau in gedruckte Schaltungen bis zu etwa 1000 MVA bei Großtransformatoren. Deshalb sind die Bauarten sehr verschieden. Im Folgenden werden nur die gemeinsamen Merkmale beschrieben.

Kern (Eisenkern)

Der Kern von Transformatoren besteht aus Elektroblech (**Bild 1**) oder aus Ferrit. Bei dem Kern aus Elektroblech unterscheidet man verschiedene Arten, nämlich Schichtkerne, Bandkerne und Schnittbandkerne. Die Blechung des Kernes oder die Verwendung von Ferrit ist erforderlich, um die Wirbelströme klein zu halten. Kerne aus Ferrit spielen fast nur in der Nachrichtentechnik eine Rolle (**Bild 2**), während in der Energietechnik überwiegend Kerne aus Elektroblech verwendet werden.

Der Kern von Transformatoren muss magnetisch möglichst gut und elektrisch möglichst schlecht leiten.

Zur Vermeidung von Verlusten und zu hoher Erwärmung muss die Bildung von Wirbelströmen nicht nur im eigentlichen Kern, sondern auch bei den Konstruktionsteilen des Transformatoren unterdrückt werden. Besonderes Augenmerk ist auf das Zusammenpressen der Kernbleche zu richten.

Das enge Zusammenpressen der Kernbleche ist erforderlich, um Brummgeräusche im Betrieb zu vermeiden. Wenn dazu Spannbolzen bzw. Spannschrauben verwendet werden, so sollten diese gegen den Eisenkern isoliert sein und außerdem aus unmagnetischem Material bestehen. Vielfach werden Spannbolzen dadurch umgangen, dass die Bleche verklebt und durch nichtmetallische Spannbänder zusammengepresst werden.

Auch bei sorgfältigem Zusammenpressen der Kernbleche tritt im Betrieb ein Brummgeräusch auf. Infolge der *Magnetostriktion* zieht sich der Eisenkern im Magnetfeld zusammen, sodass er im magnetischen Wechselfeld vibriert.

Durch sorgfältiges Zusammenpressen des Eisenkerne kann das Brummgeräusch von Transformatoren verringert, aber nicht völlig vermieden werden.

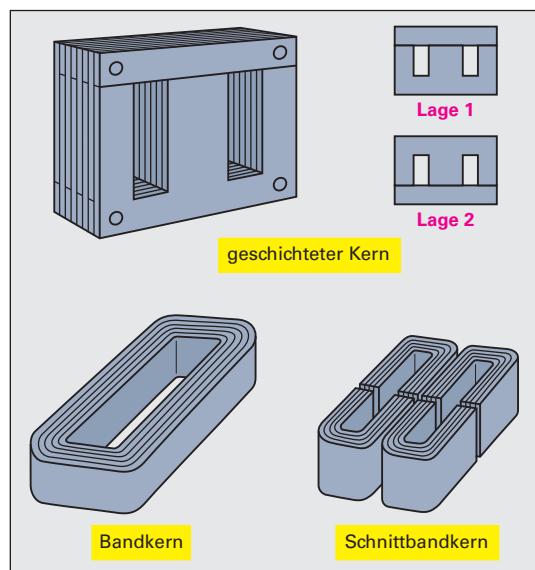


Bild 1: Kernformen von Transformatoren

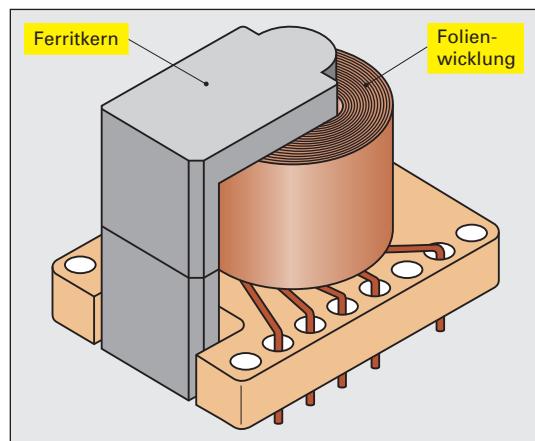


Bild 2: Transformator für ein Fernsehgerät

Querschnitt oder auch Bleche bzw. Folien verwendet (**Bild 1, folgende Seite**). Bei Kleintransformatoren wird die Wicklung auf einen Spulenkörper aufgebracht. Dieser besteht meist aus Thermoplast. Bei Kleintransformatoren ist die Wicklung meist eine *Drahtwicklung* aus mit Lack isoliertem Kupferdraht von kreisförmigem Querschnitt (Kupferlackdraht). Diese Wicklung hat mehrere Lagen, die beim Wickeln übereinander zu liegen kommen. Die Lagenzahl hängt von der Wickelhöhe (Höhe des Wickelraumes vom Spulenkörper) und vom Drahtdurchmesser ab. Innerhalb jeder Lage ist die Windungszahl je Lage von der Wickelbreite und dem Drahtdurchmesser abhängig.

Wicklung

Die Wicklung der Transformatoren besteht aus Kupfer oder aus Aluminium. Bei beiden Materialien werden Leiter mit rundem oder rechteckigem

Beispiel 1:

Bei einer Rundspule sind der mittlere Durchmesser 17 mm, die Wickelbreite 30 mm, die Wickelhöhe 8 mm, der Drahtdurchmesser 0,2 mm. Wie groß sind a) Windungszahl je Lage, b) Lagenzahl, c) Windungszahl?

Lösung:

a) $N_1 \approx 30 \text{ mm} / 0,2 \text{ mm} = 150$

b) $z \approx h/d = 8/0,2 = 40$

c) $N \approx N_1 \cdot z = 150 \cdot 40 = 6000$

Bei der *Folienwicklung* besteht jede Lage nur aus einer Windung. Dadurch ist die Spannung zwischen den Lagen niedrig und der Transformator ist sehr spannungsfest.

Bei Netzanschlusstransformatoren für elektronische Geräte liegt zwischen der Oberspannungswicklung und der Unterspannungswicklung oft eine einlagige *Schutzwicklung* mit nur einem herausgeführten Anschluss. Diese Schutzwicklung führt im Betrieb keinen Strom. Sie wird mit dem Schutzleiter verbunden. Tritt ein Isolationsfehler der an das 230-V-Netz angeschlossenen Wicklung auf, so entsteht wegen der Schutzwicklung ein Schluss zu dieser Wicklung. Da die Schutzwicklung an den Schutzleiter angeschlossen ist, entsteht eine Verbindung zum PEN-Leiter, also ein **Kurzschluss (Bild 2)**, der die Überstrom-Schutzeinrichtung auslöst und so den Transformator abschaltet.

Stromdichte

Die Stromdichte J ist eine wichtige Kenngröße von Wicklungen der elektrischen Maschinen. Sie gibt an, welche Stromstärke I je Querschnitt A eines Stromleiters vorhanden ist. Bei Wicklungen gibt man meist die Stromdichte in Ampere je Quadratmillimeter (A/mm^2) an.

Beispiel 2:

Bei einem Transformator beträgt der Drahtquerschnitt einer Wicklung $0,5 \text{ mm}^2$. Die zulässige Stromdichte ist mit 3 A/mm^2 angegeben. Wie groß darf die Stromstärke in der Wicklung sein?

Lösung:

$$J = I/A \Rightarrow I = J \cdot A = 3 \text{ A/mm}^2 \cdot 0,5 \text{ mm}^2 = 1,5 \text{ A}$$

Die zulässige Stromdichte von Transformatoren beträgt je nach Isolation, Baugröße und Kühlung 8 A/mm^2 bis 1 A/mm^2 . Am größten ist die Stromdichte bei kleinen Baugrößen. Die Verlustwärme entsteht nämlich in der Gesamtwicklung, also im Rauminhalt. Dagegen erfolgt die Kühlung nur an der Oberfläche. Bei zunehmender Baugröße wächst der Rauminhalt mit der dritten Potenz der Bauhöhe, die Oberfläche aber nur mit der zweiten Potenz.

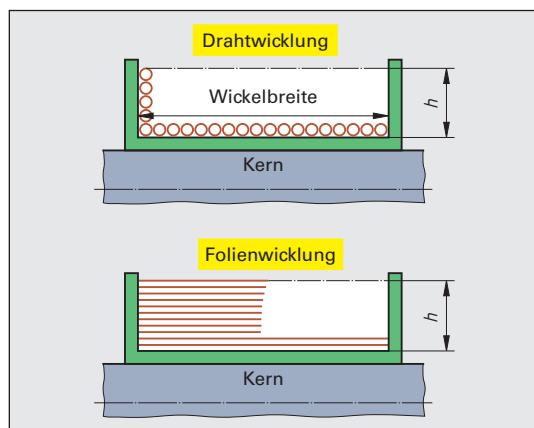


Bild 1: Wicklungsarten von Transformatoren

1 $z \approx \frac{h}{d}$

2 $N \approx \cdot N_1 \cdot z$

3 $I \approx \pi \cdot d_m \cdot N$

4 $J \approx \frac{I}{A}$

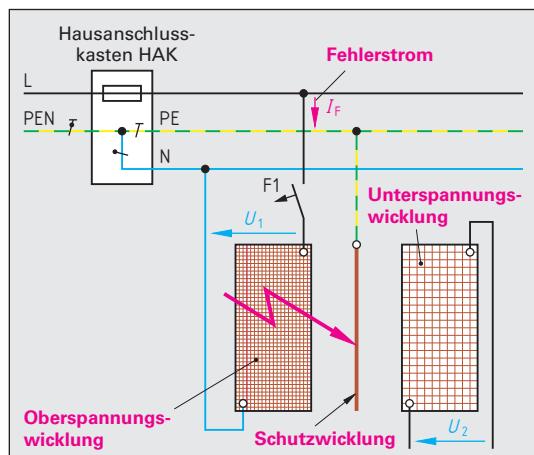


Bild 2: Wirkung der Schutzwicklung bei einem Isolationsfehler

Wiederholung und Vertiefung:

1. Beschreiben Sie den Aufbau des Transformatoren.
2. Wie lautet die Näherungsformel für die Spannungsübersetzung?
3. Aus welchem Material ist der Kern eines Transformatoren der Energietechnik meist aufgebaut?
4. Warum soll der Kern eines Transformatoren elektrisch schlecht leitend sein?
5. Welche Aufgabe hat die Schutzwicklung eines Transformatoren?

4 Versorgung mit elektrischer Energie

4.1 Ströme in öffentlichen Netzen

4.1.1 Stromarten für die Stromversorgung

Die Verbrauchsanlagen werden von den VNB (Verteilungsnetzbetreiber) je nach Alter der Stromversorgung, Lage und Bedarf mit unterschiedlichen Stromarten versorgt (**Tabelle 1**).

Meist erfolgt die Versorgung über Drehstromnetze (Dreiphasennetze). Freileitungen sind dann Dreileiternetze für Hochspannung (**Bild 1**) und Vierleiternetze für Niederspannung (**Bild 2**). Die Versorgung einer Anlage über Einphasennetze kommt fast nur beim Fahrdrahtnetz für Schienenfahrzeuge vor. Hier gelangt der Strom über den Fahrdraht zur Lokomotive und von dort zurück über Erde bzw. Schiene zur Stromquelle.

Die Versorgung der Verbraucheranlagen erfolgt meist über ein Drehstromnetz.

Die eigentümliche Frequenz der Bahnnetze von $16 \frac{2}{3} \text{ Hz} = 50/3 \text{ Hz}$ wurde bei Beginn der Elektrifizierung der Bahn gewählt, weil bei den damaligen Motoren die Stromwendung von 50 Hz nicht beherrscht wurde. Das ist durch die Stromrichtertechnik überholt worden, sodass Neuanlagen oft mit Einphasenstrom von 50 Hz arbeiten.

Die Frequenz von 60 Hz ist vor allem in den Netzen von Nordamerika verbreitet. Sie kam dadurch zu Stande, dass die Elektrifizierung dort später als in Europa stattfand. Bei 60 Hz sind die Transformatoren und Motoren etwas kleiner als bei 50 Hz.

4.1.2 Erzeugung von Drehstrom

Beim Drehstromgenerator (**Bild 1, folgende Seite**) wird ein **Läufer**, genannt auch **Polrad**, von einer Kraftmaschine, z. B. einer Turbine, angetrieben. Der Läufer besteht im Prinzip aus drei Magneten, und zwar Permanentmagneten (Dauermagneten) oder Elektromagneten mit je einem Nordpol und einem Südpol. Infolge der Läuferdrehung ändert sich in jeder Spule der Ständerwicklung dauernd der magnetische Fluss. Nach dem Induktionsgesetz entsteht also in jeder Spule dauernd eine Wechselspannung. Sind die drei Spulen räumlich um 120° gegeneinander versetzt, so haben auch die drei Wechselspannungen Phasenverschiebungen von je 120° .

Tabelle 1: Stromarten in Versorgungsnetzen		
Frequenz in Hz	typische Spannungen	Anwendung, Vorkommen
Einphasennetze		
50	230 V, 15 kV	in Europa Kleinabnehmer, selten Bahnnetz
60	100 V bis 15 kV	in Amerika Kleinabnehmer, Bahnnetz
16 2/3	15 kV	Bahnnetz in D, A und CH
Drehstromnetze		
50	400 V, 10 kV, 20 kV, 110 kV bis 380 kV	übliche Netze in Europa für NS, MS und HS
60	180 V bis 660 V, 110 kV bis 500 kV	übliche Netze für NS, MS und HS in Amerika
16 2/3	110 kV	Verteilungsnetz für die Bahn in D, A und CH
Gleichstromnetze		
0	220 V, 440 V, 15 kV	Traktion von Schienenfahrzeugen, in F auch Bahnnetz
A D HS NS	Österreich, Deutschland, Hochspannung, Niederspannung.	CH Schweiz, F Frankreich. MS Mittelspannung, Traktion Fortbewegen (Ziehen) von Schienenfahrzeugen, z. B. durch eine Lokomotive (von <i>tractus</i> = gezogen).



Bild 1: Dreileiternetz für 10 kV



Bild 2: Vierleiternetz für 400 V

Die drei Wechselspannungen kann man einem Verbraucher mit drei Wicklungssträngen zuführen, z.B. einer gleichartig gebauten zweiten Maschine (**Bild 2**). Dazu wären im Grunde sechs Leiter erforderlich, nämlich für jeden Strang zwei. Man kann aber die Stränge so miteinander verbinden, dass die Rückleitung aller drei Stränge gemeinsam erfolgt. Dann sind nur vier Leiter erforderlich. Infolgedessen sind die drei Wechselspannungen aneinander „gekettet“. Zwischen zwei Leitern eines derartigen *Vierleitersystems* besteht eine Spannung. In der gemeinsamen Rückleitung, dem *Neutralleiter*, ist die Stromstärke wegen der Phasenverschiebung zwischen den Sinusströmen in den Außenleitern höchstens so groß wie in einem Außenleiter. Bei symmetrischer Last bleibt der Neutralleiter sogar stromlos.

Dreiphasenwechselspannung besteht aus drei miteinander verketteten Einphasenspannungen, zwischen denen Phasenverschiebungen von 120° bestehen.

Schließen wir an ein derartiges *Dreiphasennetz* als Motor eine Maschine an, die wie ein Drehstromgenerator gebaut ist (Bild 2), so fließen in den drei Ständersträngen drei Wechselströme, und zwar sowohl im Generator als auch im Motor. Nach der Lenz'schen Regel (siehe Abschnitt 3.8) ist die Richtung des Stromes so, dass die Ursache gehemmt wird. Die Ursache ist aber beim Generator das magnetische Drehfeld des Läufers. Infolgedessen muss der Strom im Generator so fließen, dass vom Ständerstrom ebenfalls ein Drehfeld hervorgerufen wird, welches dieselbe Drehrichtung wie das Läuferdrehfeld hat. Da nun derselbe Strom wie im Generator auch im Motor fließt, entsteht dort ebenfalls ein magnetisches Drehfeld. Sind am Motor die Außenleiter wie am Generator angeschlossen, so haben beide Drehfelder dieselbe Drehrichtung. Vertauschen von zwei Außenleitern am Motor führt zur Änderung der Drehrichtung des Motor-Drehfeldes.

Fließt Dreiphasenwechselstrom durch drei gegeneinander räumlich versetzte Wicklungsstränge, so wird dort ein magnetisches Drehfeld erzeugt.

Wegen der Fähigkeit, ein magnetisches Drehfeld zu erzeugen, wird der Dreiphasenwechselstrom meist *Drehstrom* genannt. Das Drehfeld bildet sich jedoch nur, wenn Spulen geeignet angeordnet sind.

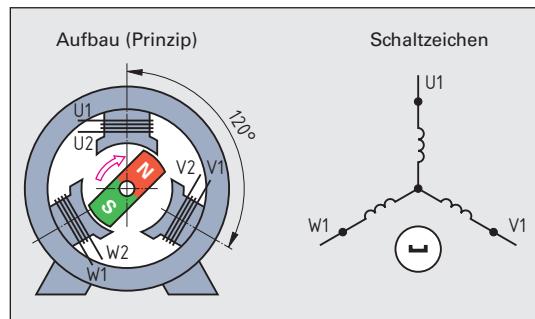


Bild 1: Drehstromgenerator

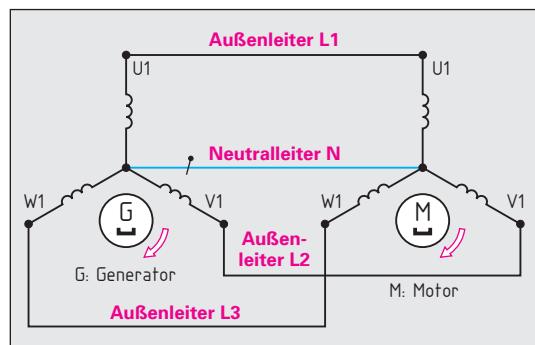


Bild 2: Vierleitersystem

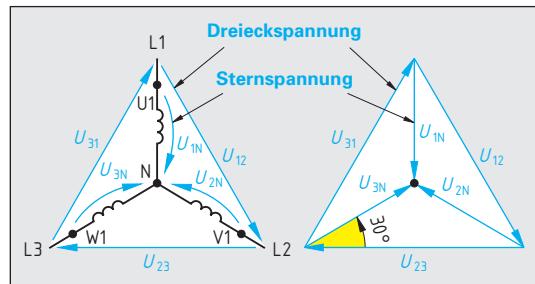


Bild 3: Spannungen am Drehstromnetz

4.1.3 Spannungen beim Drehstromnetz

Bei Niederspannung besteht ein Drehstromnetz (Bild 2) aus drei *Außenleitern* und dem *Neutralleiter*.

Der Neutralleiter ist geerdet, sodass er in einer ungestörten Anlage keine oder fast keine Spannung gegen Erde führt. Das Zeigerdiagramm der Spannungen bildet wegen der Phasenverschiebung von 120° einen Stern (**Bild 3**). Dadurch ist die Spannung zwischen den Außenleitern (*Dreieckspannung*) jeweils das $\sqrt{3}$ -Fache der Spannung zwischen Außenleiter und Neutralleiter (*Sternspannung*).

Wirkungsgrade von über 50 %. Sie können innerhalb von wenigen Minuten auf volle Leistung gebracht werden.

Gasturbinenkraftwerke und GuD-Kraftwerke werden als Mittellastwerke für kurze Anlaufzeit eingesetzt.

Der Nachteil der mit Gas arbeitenden Kraftwerke besteht in der begrenzten Speicherbarkeit von Gas. Dadurch sind derartige Kraftwerke auf eine ununterbrochene Gaszufuhr angewiesen, z.B. aus Russland.

Kleinkraftwerke mit Gasmotoren

Für gasbetriebene Kleinkraftwerke mit Nennleistungen unter etwa 300 kW gibt es keine Gasturbinen. Jedoch kann der Antrieb durch Verbrennungsmotoren erfolgen.

Für Erdgas mit hohem spezifischem Energieinhalt können Benzинmotoren (Ottomotoren) eingesetzt werden. Bei Biogas (Methan) ist das kaum möglich, weil Biogas ein Schwachgas mit geringem spezifischem Energieinhalt ist. Wegen des höheren Wirkungsgrades sind für Gasmotoren wünschenswert Dieselmotoren. Diese sind **Viertaktmotoren** mit folgenden Takten:

1. Takt: Luft wird angesaugt.
2. Takt: Luft wird komprimiert und sehr heiß.
3. Takt (Arbeitstakt): Dieselöl wird eingespritzt und entzündet sich. Über Kolben, Pleuel und Kurbelwelle wird mechanische Leistung abgegeben.
4. Takt: Kolben drückt Verbrennungsprodukt über Auslassventil ins Freie.

Der 3. Takt ist bei Gasmotoren nicht möglich. Deshalb wird das Prinzip des Dieselmotors für Gasmotoren etwas verändert.

Beim **Zündstrahlmotor** wird das Gas, z. B. Biogas, mit Verbrennungsluft gemischt und im 1. Takt angesaugt (Bild 1). Im 2. Takt wird komprimiert und anschließend wird über eine Einspritzdüse eine kleine Menge Öl, z. B. Dieselöl, als Zündstrahl eingespritzt. Dieser entzündet sich wegen der Komprimierung und zündet nun seinerseits das Gas-Luftgemisch. Danach folgen wie beim Dieselmotor der 3. Takt und der 4. Takt.

Der Zündstrahlmotor arbeitet anfangs wie ein Benzинmotor, aber danach durch Zündung mittels eingespritztem Zündöl wie ein Dieselmotor.

Zündstrahlmotoren werden mit Bemessungsleistungen von 40 kW bis 1 000 kW = 1 MW betrieben.

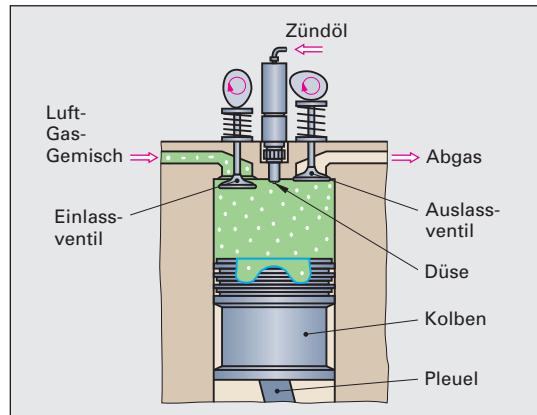


Bild 1: Zündstrahlmotor bei Ende von Takt 1
www.schnellmotor.de

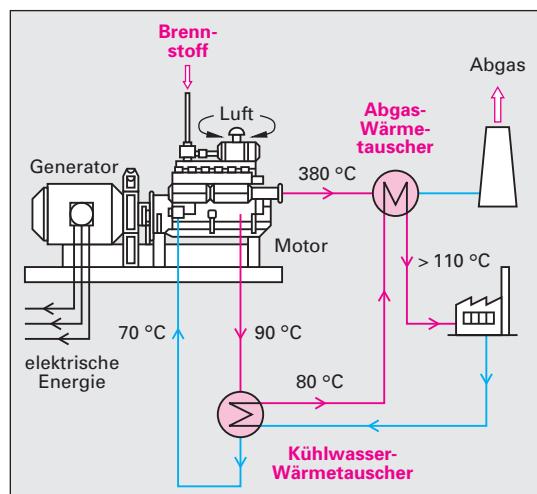


Bild 2: Blockheizkraftwerk

Blockheizkraftwerke

Blockheizkraftwerke (BHKW) sind Kleinkraftwerke mit maximaler Bemessungsleistung des Generators von einigen Hundert kW. Sie dienen zur Erzeugung von Strom und von Heizungswärme (Bild 2).

Als Antriebsmotoren werden meist Dieselmotoren oder Zündstrahlmotoren verwendet. Eingesetzt sind BHKW vor allem in Anlagen, in denen gleichzeitig Strom und Wärme gebraucht wird, z. B. in Verwaltungen, Schulen und Schwimmbädern.

Grundsätzlich haben BHKW bezüglich der Stromerzeugung einen niedrigen Wirkungsgrad. Jedoch sind sie trotzdem effizient, weil wegen ihrer Nähe zur Nutzung der Abwärme diese leichter als bei Großkraftwerken mit Nutzen verwertbar ist.

Aussagen zum Umweltschutz

In Bezug auf den Umweltschutz sind Verbrennungskraftwerke problematisch. Wegen der angestrebten hohen Verbrennungstemperatur entstehen immer Stickoxide und Kohlenstoffmonoxid. Je nach Brennstoff entsteht Schwefeldioxid, insbesondere bei Braunkohle und Steinkohle. Zur Entstickung und Entschwefelung sind teure Anlagen erforderlich. In jedem Fall wird aber Kohlenstoffdioxid CO_2 abgegeben, bei Öl oder Erdgas wegen des H-Gehaltes weniger als bei Kohle. Trotzdem ist in der Öffentlichkeit und Politik die Bereitschaft zum Bau von Verbrennungskraftwerken größer als zum Bau von Kernkraftwerken.

4.3.2 Kernkraftwerke (Atomkraftwerke)

Bei Kernkraftwerken wird in einem Reaktor die Kernenergie in Wärmeenergie umgesetzt. Wasserdampf treibt wie bei einem Verbrennungskraftwerk eine Dampfturbine an und wird im Kondensator zu Wasser, das dem Reaktor wieder zugeführt wird (Bild 1).

Beim *Siedewasserreaktor* wird der im Reaktor selbst erzeugte, radioaktive Dampf der Turbine zugeführt (Bild 1). Bei Undichtigkeit der Turbine wird dann Radioaktivität freigesetzt.

Bei Siedewasserreaktoren wird die Turbine von Dampf angetrieben, der direkt aus dem Reaktor stammt.

Beim *Druckwasserreaktor* gibt das im Reaktor unter hohem Druck aufgeheizte Wasser des Primärkreises seine Energie in einem Wärmetauscher an den Sekundärkreis ab (Bild 2). Dessen nicht radioaktiver Dampf treibt dann eine Dampfturbine an. Dieser bevorzugte Reaktortyp weist eine höhere Betriebssicherheit auf, da der radioaktive Dampf des Primärkreises nicht zur Turbine gelangt.

Kernkraftwerke erfordern umfangreiche Regeleinrichtungen. Deshalb dauert ein Hochfahren der Anlage einige Stunden.

Kernkraftwerke arbeiten als Grundlastwerke.

In Bezug auf den Umweltschutz erscheinen Kernkraftwerke günstiger als Verbrennungskraftwerke, da sie bei normalem Betrieb fast keine Emissionen hervorrufen.

Die gasförmigen Spaltprodukte der Brennelemente (Xenon und Krypton) werden bei deutschen Anlagen in einer Abgasanlage zurückgehalten, bis ihre Radioaktivität abgeklungen ist. Danach werden sie an die Luft abgegeben, und zwar mit weniger als 1 % der natürlichen Radioaktivität.

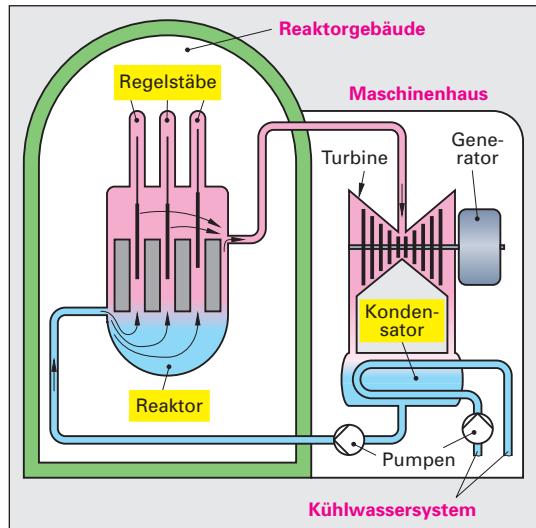


Bild 1: Prinzip des Siedewasserreaktors

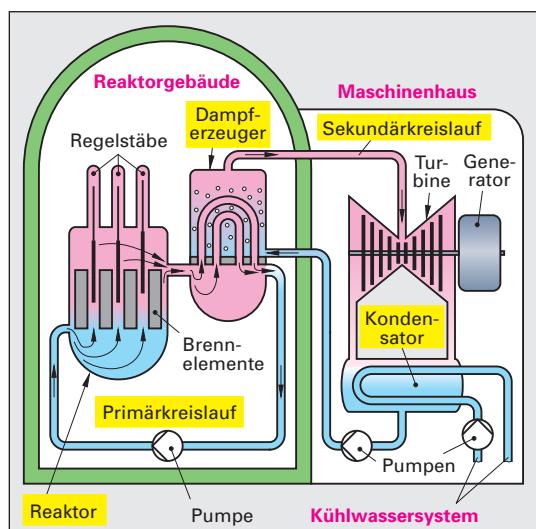


Bild 2: Prinzip des Druckwasserreaktors

In der Umgebung von Kernkraftwerken darf in Deutschland die Radioaktivität höchstens um 1 % höher sein als die natürliche Radioaktivität.

Radioaktives Abwasser der Siedewasserreaktoren wird gereinigt und dem Kühlkreislauf zugeführt. Kurzlebige radioaktive Rückstände, z. B. aus Luftfiltern oder Ionenaustauschern, werden verbrannt. Radioaktive Rückstände der Verbrennung werden in 200-Liter-Fässern einbetoniert und im Kraftwerk zwischengelagert. Später sollen sie in Deutschland in ein Endlager gebracht werden.

Etwa 99 % der Radioaktivität von Atomkraftwerken fallen in den nach mehrjährigem Betrieb verbrauchten Brennelementen an, die stark radioaktiv sind.

Verbrauchte Brennelemente werden in wassergefüllten Brennstofflagern im Kraftwerk etwa sechs Monate zum Abklingen der Radioaktivität gelagert und danach z. B. in Frankreich, Russland oder England aufgearbeitet. In Deutschland hat man auf die Aufarbeitung aus politischen Gründen verzichtet.

Für den Transport zur Aufarbeitung werden dickwandige Transportbehälter verwendet, die einem Unfall standhalten. Bei der Aufarbeitung werden die meist radioaktiven Spaltprodukte vom Uran bzw. Plutonium getrennt. Das so gereinigte Uran bzw. Plutonium wird wieder zu Brennelementen verarbeitet (Bild 1).

Die Spaltprodukte fallen während der Aufarbeitung als Säurelösung an. Diese wird in einem Drehrohrofen eingedampft. Das entstehende Oxidpulver wird mit einem Borsilikatglas bei 1100 °C verschmolzen. Die schmelzflüssige Glasmasse von etwa 400 kg wird in einen Edelstahlbehälter eingefüllt, in der sie erstarrt. Dieser Behälter (Glaskokille) wird in ein *Zwischenlager* des Kernkraftwerkes gebracht.

Spaltprodukte der Brennstäbe von Kernkraftwerken werden in Glas eingeschmolzen und in ein Zwischenlager gebracht.

Wenn die Wärmeleistung einer Glaskokille infolge des radioaktiven Zerfalls der Spaltprodukte auf etwa 2 kW abgefallen ist, werden die Glaskokillen zu einem *Endlager* bzw. vorläufigen Endlager befördert. Dazu werden 20 bis 28 Glaskokillen in einen Transportbehälter gebracht.

Der Transportbehälter Castor besteht aus einem dickwandigen, zähnen Gusseisen (Sphäroguss) von etwa 100 t Masse. Er fasst etwa 12 t Kokillen.

Die Endlager werden außerhalb von Deutschland dort eingerichtet, wo die geologische Beschaffenheit auf lang dauernde Abgeschlossenheit hindeutet, z. B. in Salzablagerungen.

In Deutschland konnte bisher aus politischen Gründen noch kein Endlager eingerichtet werden. Die Transportbehälter (Castoren) bleiben deshalb in den Zwischenlagern, die dadurch vorläufige Endlager sind.

Bei einem großen Kernkraftwerk fallen pro Jahr an:

- 735 t schwachaktive oder mittelaktive Abfälle,
- 12 t starkaktive Abfälle (jeweils mit Behältern und Verfestigungsmaterial).

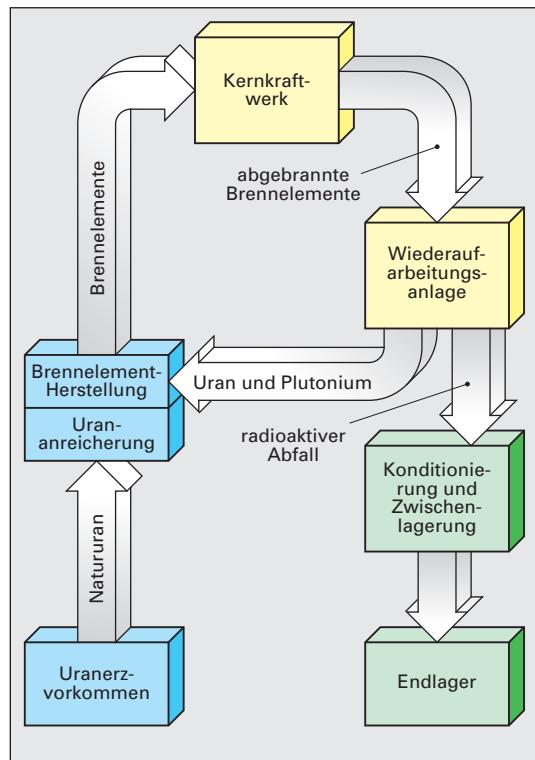


Bild 1: Brennstoffkreislauf für Kernkraftwerke

In einem Kohlekraftwerk gleicher Leistung fallen ohne Entschwefelung und Entstickung an:

- 7 500 000 t Kohlenstoffdioxid,
- 40 000 t Schwefeldioxid,
- 20 000 t Stickstoffoxide,
- 5 000 t Staub,
- 350 000 t Asche und Schlacke,
- 120 000 t Schlamm.

In Kernkraftwerken fallen im Vergleich zu Verbrennungskraftwerken weniger Abfälle an, die aber besonders gefährlich sind.

Wiederholung und Vertiefung:

1. Welche Eigenschaft hat der elektrische Strom in Bezug auf seine Speicherbarkeit?
2. Nennen Sie die beiden wichtigsten Kraftwerkarten für die meisten Länder.
3. Zu welcher Energieart wird die Wasserkraft gerechnet?
4. Welche drei Arten von Kraftwerken unterscheidet man in Bezug auf ihre Last?
5. Geben Sie die Berechnungsformel für den größtmöglichen Wirkungsgrad einer Wärmekraftmaschine an.
6. Welche Aufgabe hat in einem Dampfkraftwerk der Kondensator?

4.4 Regenerative Stromerzeugung

Man spricht von regenerativer (erneuerbarer) Stromerzeugung, wenn der Energieträger sich durch Naturkräfte ständig erneuert. Den größten Anteil dabei haben im öffentlichen Versorgungsnetz der EU (Europäische Union) mit etwa 80 % der regenerativen Stromerzeugung die seit langem bewährten Wasserkraftwerke.

In Deutschland beträgt die Stromerzeugung der Windkraftwerke mehr als das Doppelte der Stromerzeugung der Wasserkraftwerke.

4.4.1 Wasserkraftwerke

Bei den Wasserkraftwerken wird die mechanische Energie des Wassers in einer Turbine in Bewegungsenergie zum Antrieb eines Generators umgesetzt.

Laufkraftwerke

Laufkraftwerke benötigen dauernd fließendes Wasser, z. B. eines Flusses (Bild 1). Meist haben Laufkraftwerke eine nach dem Erfinder benannte *Kaplanturbine* mit senkrechter Welle oder mit waagerechter Welle. Kaplanturbinen mit waagerechter Welle ermöglichen den unauffälligen Einbau der Anlage in das Gewässer. Der Höhenunterschied (die Fallhöhe) kann bis etwa 30 m betragen.

Laufkraftwerke können die Grundlast in einem Netz übernehmen, solange genügend Wasser zur Verfügung steht.

Speicherkraftwerke und Pumpspeicherkraftwerke

Bei Speicherkraftwerken und Pumpspeicherkraftwerken sind durch eine Staumauer gebildete Stauseen als oberes Becken vorhanden, das von einem unteren Becken einen großen Höhenunterschied von z. B. 300 m hat (Bild 2).

Als Turbinen werden bei Fallhöhen bis 700 m die nach dem Erfinder benannten *Francisturbinen* mit waagerechter Welle und bei sehr großen Fallhöhen die *Peltonturbinen* mit senkrechter Welle verwendet. Die Turbinen sind direkt mit dem Generator gekoppelt. Bei den Pumpspeicherkraftwerken ist zusätzlich am Generator eine Pumpe angekoppelt.

Die Turbinen und Generatoren von Speicherkraftwerken und Pumpspeicherkraftwerken können innerhalb von etwa 1 min mit voller Leistung ans Netz geschaltet werden. Sie können nach Fortfall des Bedarfs unverzüglich abgeschaltet werden.

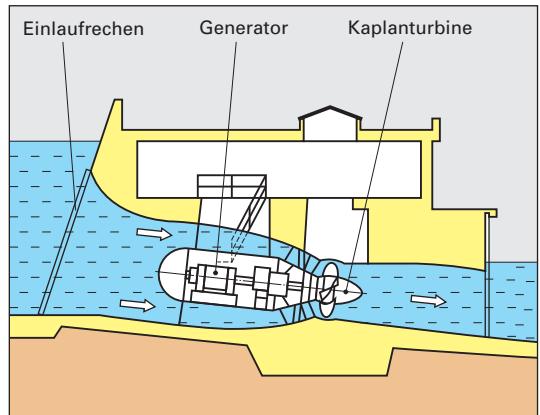


Bild 1: Laufkraftwerk mit Kaplanturbine

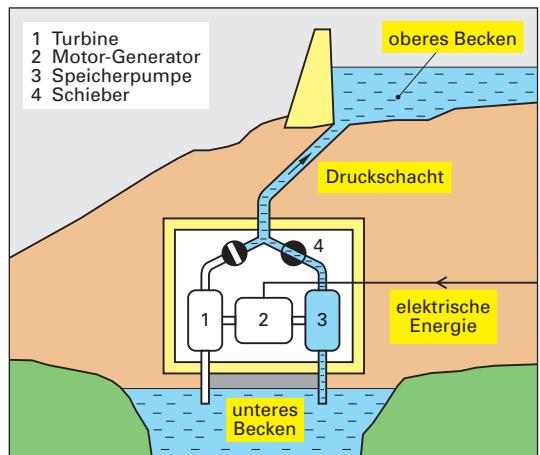


Bild 2: Pumpspeicherkraftwerk im Pumpbetrieb

Speicherkraftwerke und Pumpspeicherkraftwerke werden für die Spitzenlastdeckung verwendet.

Bei den Pumpspeicherkraftwerken wird bei Stromüberschuss, z. B. aus Atomkraftwerken, das Wasser vom unteren Becken in das obere Becken gepumpt. Das ist möglich, da der Generator als Motor arbeiten kann. Im Pumpbetrieb läuft die Turbine leer mit.

Leider ist der Wirkungsgrad der Speicherung nicht sehr hoch, da die Energie mehrfach umgesetzt wird. Bei hohen Einzelwirkungsgraden von 0,9 für Motor, Pumpe, Turbine und Generator beträgt der Gesamtwirkungsgrad ohne Berücksichtigung der Reibungsverluste der Wasserführung nur $\eta = 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 0,9 = 0,66 (= 66\%)$.

Pumpspeicherkraftwerke bieten bisher die einzige Möglichkeit, große elektrische Energien wirtschaftlich zu speichern.

Gezeitenkraftwerke

Gezeitenkraftwerke entnehmen der Rotationsenergie der Erde die Energie für den Turbinenantrieb. Sie sind an Stellen mit einem großen Unterschied der Meereshöhe zwischen Ebbe und Flut in Betrieb.

Wellenkraftwerke

Wellenkraftwerke nutzen die vom Wetter hervorgerufene Wellenenergie der Meere. Der World Energy Council (Welt-Energie-Rat) schätzt das Potenzial für die Wellenkraftwerke auf etwa 1 Terawatt, also auf 1000 Kraftwerke zu jeweils 1000 MW. Die Energie ist aber nur aufwendig zu erfassen und der Strom ist nur begrenzt planbar.

Gezeitenkraftwerke und Wellenkraftwerke können nur zeitweise Strom liefern.

Bei der *Wave-Dragon-Technik* (Wellen-Drachen-Technik) wird durch zwei V-förmig angeordnete Barrieren die Welle auf eine Rampe geleitet. Von dort aus fließt das Wasser über eine Turbine ins Meer zurück. Die gesamte Anlage kann schwimmend vor der Küste betrieben werden.

Bei der *OWC-Technik* (OWC von Oscillating Water Column = schwingende Wassersäule) rollt die Welle in eine große gegen die Atmosphäre geschlossene Betonkammer. Die in der Kammer befindliche Luft wird dadurch nacheinander zusammengepresst und entspannt. Über eine Luftturbine wird ein Generator angetrieben.

Beim *Wave Energy Converter* werden als Segmente Bojen von z. B. 3 m Durchmesser verwendet, die zu Dritt einer Riesenschlange ähneln (**Bild 1**). Die miteinander mit Gelenken verbundenen Segmente liegen auf der Wasseroberfläche quer zu den Wellenkämmen. Nahe der Gelenke zwischen den Segmenten liegen hydraulische Motoren, welche die Wellenbewegung in eine Strömung der Hydraulikflüssigkeit umsetzen. Die Flüssigkeit treibt einen Generator an. www.eon.com

Für den Umweltschutz sind Wasserkraftwerke vorteilhaft, weil sie keine Emissionen hervorrufen. Wenn das Wasser gespeichert werden kann, z. B. bei den Speicherkraftwerken, dann können sie Strom erzeugen, wenn dafür Bedarf besteht. Ihre Stromerzeugung ist meist planbar.

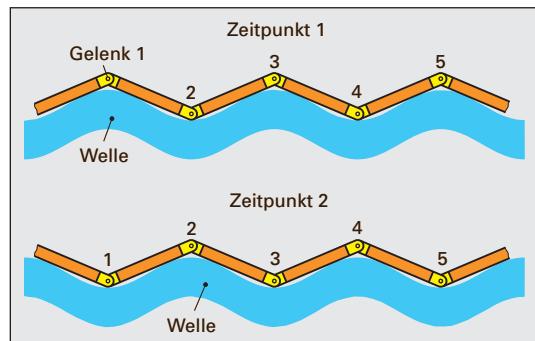


Bild 1: Prinzip des Wave Energy Converters

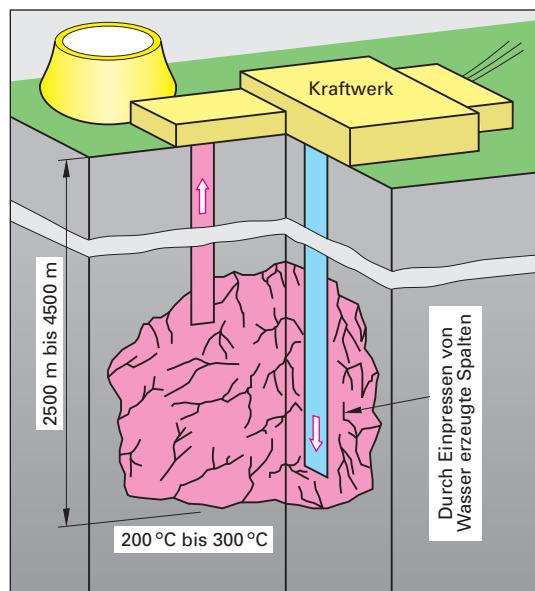


Bild 2: Prinzip des geothermischen Kraftwerks

4.4.2 Regenerative thermische Stromerzeugung

Geothermische Kraftwerke verwenden den Wärmeverrat des Erdinneren zur Dampferzeugung (**Bild 2**). Der Dampf treibt über eine Dampfturbine den Generator. Diese Kraftwerke können vor allem dort gebaut werden, wo die Erdkruste dünn ist, z. B. in der Nähe von Vulkanen. In den deutschsprachigen Ländern sind keine derartigen Kraftwerke in Betrieb, jedoch wird für einige Standorte die Errichtung untersucht.

Geothermische Kraftwerke haben gegenüber den meisten regenerativen Energien den Vorteil, dass die Energiequelle ständig zur Verfügung steht, sodass die Stromerzeugung planbar ist.

Biomasse-Kraftwerke nutzen die gespeicherte Energie der Biomasse durch Verbrennen in Wärme-kraftwerken. Das Potenzial dazu ist in Form von Restholz, Stroh, Gülle und sonstigen Bioabfällen ziemlich groß (**Bild 1**). Beim Verbrennen der Biomasse entsteht nur so viel Kohlenstoffdioxid, wie von Pflanzen vorher aus der Atmosphäre aufgenommen wurde. Bei vollständiger Erfassung könnten durch Biomasse etwa 9 % der Stromerzeugung gedeckt werden.

Holz-befeuerte Kraftwerke gehören zu den regenerativen Stromerzeugern mit dauernder Strom-Lieferfähigkeit. Man verwendet Holzschnitzel oder Holz-Pellets. Damit kann sonst wertloses Abfallholz, z. B. aus der Waldflege, nutzbringend verwertet werden.

Biogas-Kraftwerke gehören ebenso zu den regenerativen thermischen Kraftwerken mit ständiger Strom-Verfügbarkeit. Sie arbeiten wie mit Erdgas beschickte GuD-Kraftwerke (GuD von **Gas** und **Dampf**), nämlich Verbrennung in Gasturbinen, deren Abgas zur Dampferzeugung verwendet wird. Das brennbare Biogas, hauptsächlich Methan CH_4 , entsteht in Faultürmen, die mit Biomasse, z. B. Gülle oder landwirtschaftliche Abfälle, beschickt werden.

Stromerzeugung in Biomasse-Kraftwerken hat den Vorteil, dass der Energieträger gespeichert werden kann, sodass die Stromerzeugung jederzeit möglich ist.

Solarthermische Kraftwerke arbeiten mit der von der Sonne herrührenden Strahlungswärme. Beim **Solarturm** ist ein Absorber mit einer Brennerkammer mit Dampfkessel auf einem Turm angeordnet (**Bild 2**). Hunderte von Spiegeln sind auf einer großen Fläche aufgestellt und werden fortlaufend so eingestellt, dass die Sonnenstrahlung auf den Absorber gerichtet ist. Die sehr hohe Erwärmung erzeugt, wie in einem Verbrennungskraftwerk, Wasserdampf der über eine Turbine den Generator antreibt.

Beim **Parabolrinnen-Kraftwerk** sind Parabolrinnen-Kollektoren (Rinnen mit Parabel-Profil) von bis 150 m Länge auf einer großen Fläche angeordnet (**Bild 3**). Diese Rinnen bündeln die Sonnenstrahlen. In der Brennlinie der Kollektoren verläuft ein Rohr als Absorber mit einem Wärmeträger. Wenn als Wärmeträger Wasser verwendet wird, dient das Absorberrohr als Dampfkessel. Meist wird aber ein Thermoöl (wärmebeständiges Öl) verwendet, sodass Temperaturen von bis 300 °C möglich sind. Das heiße Öl gibt dann in einem Wärmetauscher die Wärmeenergie an den Dampfkessel ab, sodass ein hoher Druck möglich ist.

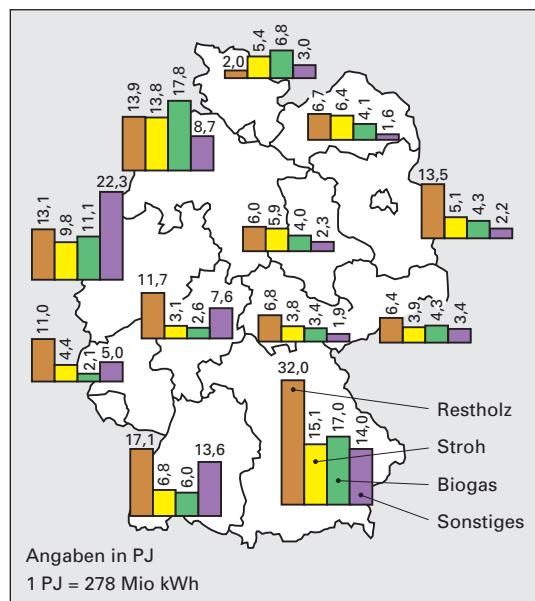


Bild 1: Potenzial an Biomasse in Deutschland

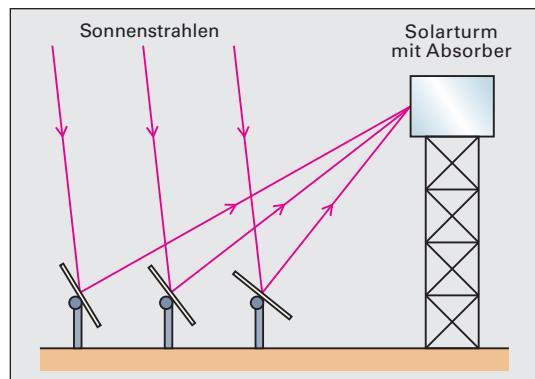


Bild 2: Solarturmkraftwerk

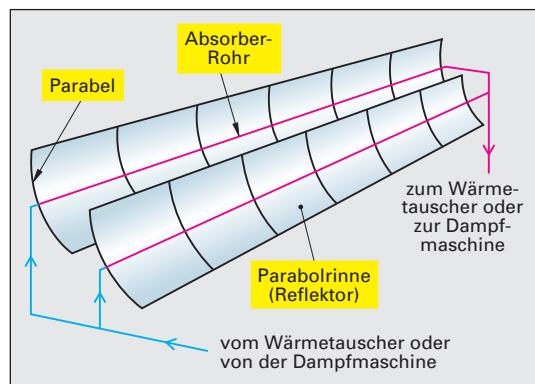


Bild 3: Parabolrinnen-Kraftwerk

Tabelle 1: Arten von Brennstoffzellen

Brennstoffzelle	Elektrolyt	Anodengase	Temperatur	Leistung	Anwendungen	Stand
AFC (Alkaline Fuel Cell)	Kalilauge	Wasserstoff	bis 80 °C	10kW bis 100 kW	Raumfahrt, U-Boote	kommerziell
PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell)	Polymer-membran	Wasserstoff (Methanol) (Methan)	bis 120 °C	0,03 bis 1 kW 20 bis 250 kW 5 bis 10 kW 20 bis 250 kW	Stromversorgung, Pkw/Bus, Hausversorgung, Blockheizkraftwerke	Entwicklung
PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)	Phosphorsäure	Wasserstoff (Methan)	200 °C	50 bis 200 kW 50 bis 11000 kW	Blockheizkraftwerke, Kleinkraftwerke	kommerziell
MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)	Alcalicarbonatschmelzen	Wasserstoff, Methan, Kohlegas	600 bis 700 °C	250 bis 2000 kW	Blockheizkraftwerke, Kleinkraftwerke	Entwicklung
SOFC (Solid Oxid Fuel Cell)	keramischer Festelektrolyt	Wasserstoff, Methan, Kohlegas	800 bis 1000 °C	1 bis 5 kW 5 bis 100 kW	Hausversorgung, Kleinkraftwerke	Entwicklung

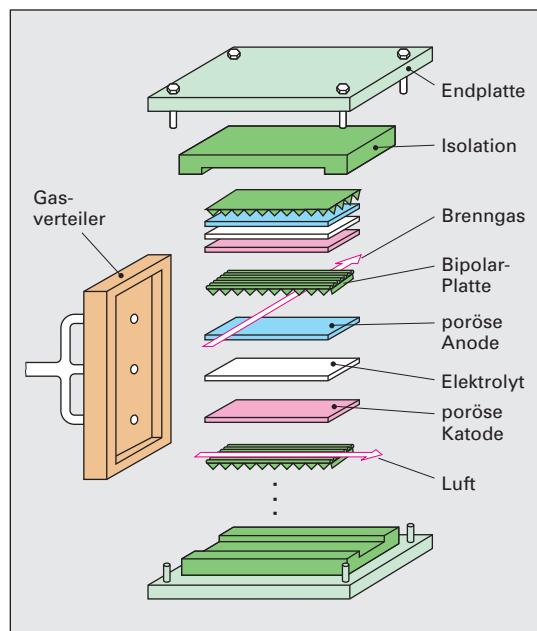
Durchsetzen konnten sich Brennstoffzellen bisher vor allem dort, wo Geld keine sonderliche Rolle spielt, also in der Raumfahrt, beim Antrieb von U-Booten und bei Vorzeigevorhaben der Politik.

Die AFC haben eine begrenzte Lebensdauer von etwa 4000 h und der Wasserstoff muss sehr rein sein. Am ehesten versprechen die Typen PAFC und MCFC Erfolg.

Bei MCFC (Karbonatbrennstoffzelle) sind bis zu 300 Elemente aus poröser Nickelanode, Schmelzelektrolyt, poröser Nickelkatode und Abstandhaltern zur Gaseinführung (Bipolar-Platte) übereinander geschichtet (Bild 1). An den vier Seiten der Brennstoffzelle sind die Gashauben (Gasverteiler und Gassammler) angebracht. Das Brenngas fließt durch den vorderen Gasverteiler entlang der Unterseite der Bipolarplatte, sodass es an der Anode mit dem im Elektrolyt gelösten Sauerstoff reagieren kann. Das Anodenabgas wird im hinteren Gassammler abgeführt. Entsprechend wird der Kathode durch einen linken Gasverteiler Luft zugeführt, die den Brennstoffzellenblock über den Gassammler auf der anderen Seite mit kleinerem O₂-Anteil wieder verlässt.

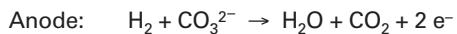
Bereitstellung des Brenngases

Grundsätzlich benötigen die Brennstoffzellen zum Betrieb Wasserstoff H₂. Dieser wird bei den meisten Brennstoffzellen in einem *Reformer* aus dem eigentlichen Brenngas, z.B. Methan CH₄, mithilfe eines Katalysators hergestellt (Bild 1, folgende Seite). Das geschieht nach der Summenformel

**Bild 1: Aufbau einer Karbonatbrennstoffzelle**

Bei Brennstoffzellen mit niedriger Betriebstemperatur muss der erforderliche Wasserstoff in einem Reformer aus dem Brenngas erzeugt werden.

An der Anode und der Kathode erfolgen die eigentlichen Reaktionen für die Stromerzeugung.



Beim Verfahren MCFC kann wegen der hohen Betriebstemperatur die Erzeugung des H_2 direkt in der Zelle erfolgen (Bild 2).

Dort wird z. B. CH_4 mit Wasser zugeführt, zu CO_2 und H_2 aufgespalten und mittels des Luftsauerstoffs zur Erzeugung von elektrischem Strom und von Wärme verwendet. Entsprechend arbeiten diese Zellen auch mit Methanol als Brennstoff.

Brennstoffzellen mit hoher Betriebstemperatur können direkt mit einem Kohlenwasserstoff, z. B. Methan oder Methanol, arbeiten.

Wirtschaftlichkeit der Brennstoffzellen

Brennstoffzellen erzeugen im Betrieb eine erhebliche Wärme. Brennstoffzellen sind am meisten dann wirtschaftlich, wenn diese Wärme verwertet werden kann. Das ist vor allem dann möglich, wenn es sich um Brennstoffzellen mit hoher Betriebstemperatur handelt. Dann kann die Wärme zum Antrieb einer Dampfturbine verwendet werden. Sonst ist die Wärme nur zum Heizen verwendbar.

Aus ökologischer Sicht sind Brennstoffzellen-Kraftwerke nur dann sinnreich, wenn ihre Wärme dezentral, also ähnlich wie bei Blockheizkraftwerken, eingesetzt wird. Dabei sind ihre Abgase ähnlich wie die von Blockheizkraftwerken, die mit Kohlenwasserstoffen oder Erdgas betrieben werden.

Als aussichtsreich wird die Verwendung von Brennstoffzellen zum Antrieb von Kraftfahrzeugen mittels Elektromotoren betrachtet, da dann weniger giftige Abgase als bei Verbrennungsmotoren entstehen.

Wiederholung und Vertiefung:

1. Inwiefern besteht zwischen der Brennstoffzelle und der Wasserzersetzung ein Zusammenhang?
2. Welche beiden Gase sind zum Betrieb einer Brennstoffzelle erforderlich?
3. Wie wird bei der Brennstoffzelle der Minuspol bezeichnet?
4. Warum werden Brennstoffzellen mit einer hohen Betriebstemperatur betrieben?
5. An welcher Elektrode einer Brennstoffzelle wird Luft eingeblasen?
6. Warum sind Brennstoffzellen-Kraftwerke nur bei dezentralem Einsatz wirtschaftlich möglich?
7. Nennen Sie Anwendungen von Brennstoffzellen.
8. Warum sind Brennstoffzellen-Kraftwerke wirtschaftlich, wenn die Brennstoffzellen eine hohe Betriebstemperatur haben?

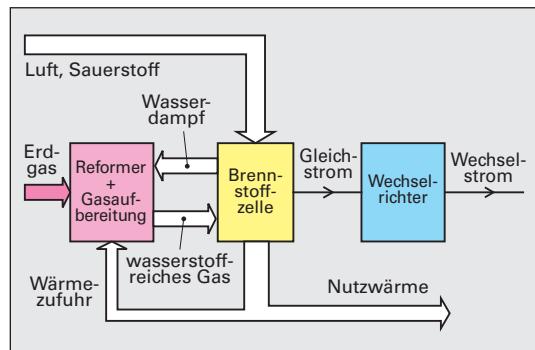


Bild 1: Funktionsblöcke eines Brennstoffzellen-Kraftwerks

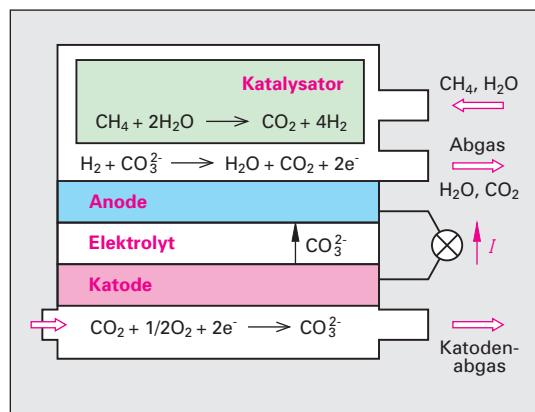


Bild 2: Betrieb einer Brennstoffzelle mit Erzeugung von H_2

4.4.6 Ausgleich schwankender Stromerzeugung

Bei der regenerativen Stromerzeugung ist die Primärenergie (Eingangsenergie) meist nicht speicherbar, z. B. der Wind oder die Strahlung der Sonne, oder nur sehr beschränkt, z. B. das Erdgas der Brennstoffzelle. Deshalb deckt sich der Anfall des regenerativen Stromes meist nicht mit der Zeit des Strombedarfes.

Bei der regenerativen Stromerzeugung sollte die erzeugte elektrische Energie gespeichert werden können.

Der naheliegende Gedanke, überschüssigen Strom in Akkumulatoren zu speichern, ist problembehaftet.

- Akkumulatoren erfordern Gleichstrom, erzeugt wird aber meist Wechselstrom,
- die zweifache Konvertierung beim Laden und Entladen verursacht hohe Verluste,
- Akkumulatoren der erforderlichen Kapazität wären sehr teuer und umweltgefährdend.

Deshalb kann diese Art des Ausgleichs nur dezentral in Kleinanlagen erfolgen, z.B. in Wohnhäusern mit eigener PV-Anlage. Hier sollte sowieso ein Akkumulatoren-System für den fortlaufenden Ausgleich zur Verfügung stehen. Hat der Hausbewohner dazu noch ein E-Fahrzeug mit Batterie, kann sogar diese zur Kapazitätserweiterung herangezogen werden, solange der Fahrzeugbesitzer im Hause bleibt (www.powerware.de).

Ausgleich schwankender Stromerzeugung durch Akkumulatoren ist am ehesten in Kleinanlagen mit PV-Stromerzeugung möglich.

Die Speicherung elektrischer Energie mittels Pumpspeicher-Kraftwerken wurde schon beschrieben (Abschnitt 4.4.1). Diese können aber nur im Gebirge errichtet werden, also nicht immer in der Nähe der Stromerzeugung, und in Deutschland wegen des Umweltschutzes überhaupt nicht.

Zusätzliche Pumpspeicher-Kraftwerke können in Deutschland zum Ausgleich der schwankenden Stromerzeugung nicht gebaut werden.

Eine Möglichkeit zum Ausgleich bieten die CAES-Kraftwerke (CAES vom Compressed Air Energy Storage = Druckluft-Energie-Speicher). Bei ihnen wird überschüssige Energie dem elektrischen Antrieb von Kompressoren zugeführt, welche Druckluft erzeugen, die in unterirdischen Hohlräumen, z.B. stillgelegten Bergwerken, gespeichert wird (Bild 1). Dieses Verfahren zur Speicherung wird auch bei Erdgas angewendet.

Bei Bedarf an elektrischer Energie wird die gespeicherte Druckluft einer Gasturbine zugeführt (Bild 2). Dabei kann die sonst übliche Kompression der Verbrennungsluft entfallen. Das zugeführte Erdgas wird in der Turbine verbrannt, sodass die Druckluft auf hohe Temperatur erhitzt wird und die Turbine antreibt. Diese treibt dann einen Generator zur Stromerzeugung an. Im Unterschied zu Pumpspeicher-Kraftwerken ist bei den CAES-Kraftwerken Erdgas erforderlich, sodass eigentlich ein optimiertes Gasturbinen-Kraftwerk vorliegt.

CAES-Kraftwerke befinden sich in Huntorf (Niedersachsen), Alabama (USA) und Ohio (USA). Ihr Wirkungsgrad wird mit bis zu 56 % angegeben.

Eine weitere Möglichkeit zum Ausgleich der schwankenden Produktion bei regenerativer Stromerzeugung besteht in der Produktion von Wasserstoffgas durch Elektrolyse bei Energieüberschuss. Dieses Gas kann dann gespeichert werden und wird in Zeiten von Energiebedarf zur Erzeugung von Strom verwendet, z. B. in Brennstoffzellen. Entsprechende Anlagen sind z. Z. erst in Planung.

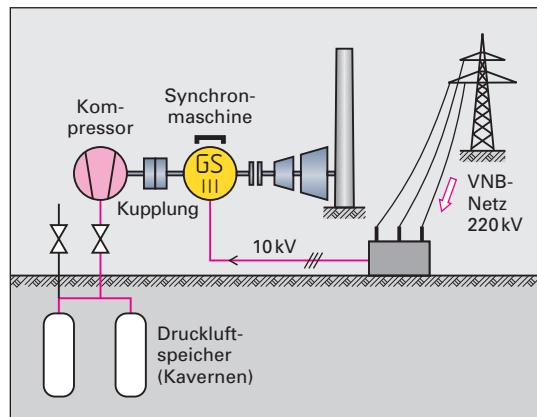


Bild 1: Verdichtungsteil einer CAES-Anlage

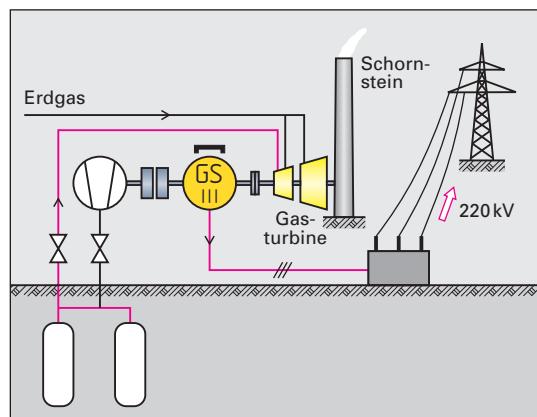


Bild 2: Gasturbinenteil einer CAES-Anlage

Regenerative Stromerzeugung ist meist eine zeitlich schwankende Stromerzeugung, der Ausgleich kann durch Akkumulatoren, Pumpspeicher-Kraftwerke, CAES-Kraftwerke und Wasseroxydiererzeugung erfolgen.

Wiederholung und Vertiefung:

1. Welchen Nachteil hat die regenerative Stromerzeugung?
2. Welche Möglichkeiten zum Ausgleich einer schwankenden Stromerzeugung gibt es?
3. Warum können für Windkraftanlagen in Küstennähe in Deutschland keine Pumpspeicher-Kraftwerke errichtet werden?
4. Welche Kosten ersparen die regenerativen Stromerzeuger für die Betreiber der Kraftwerke?
5. Beschreiben Sie den Aufbau eines CAES-Kraftwerkes.
6. Geben Sie den wesentlichen Unterschied zwischen einem Pumpspeicher-Kraftwerk und einem CAES-Kraftwerk an.

4.5 Stromtransport

4.5.1 Zweck der Spannungstransformation

Die Erzeugung elektrischer Energie erfolgt in Kraftwerken. Die in den Generatoren entstehende Spannung beträgt meist 6 kV bis 30 kV. Diese Spannung ist zu niedrig, um den erzeugten Strom über größere Strecken möglichst verlustfrei transportieren zu können. Das liegt daran, dass Leitungen einen elektrischen Widerstand besitzen. Um die Verlustleistung P_v möglichst klein zu halten, müssen entweder der elektrische Widerstand oder die Stromstärke verringert werden (Abschnitt 4.5.6).

Um den elektrischen Widerstand der Leitung zu verringern, verwendet man Werkstoffe mit kleinem speifischem Widerstand oder der Leitungsquerschnitt wird erhöht. Aus wirtschaftlichen Gründen sind diese Maßnahmen jedoch nicht sinnvoll. Durch die Erhöhung der Spannung auf ein Vielfaches des ursprünglichen Wertes, z. B. auf eine Spannung von 380 kV, wird jedoch die Stromstärke ebenfalls verringert (Bild 1). Dadurch wird die Verlustleistung deutlich kleiner.

Faustregel: Strom kann mit einer Bemessungsspannung von 380 kV wirtschaftlich ohne Zwischenstationen über eine Entfernung von etwa 380 Kilometern transportiert werden.

Da die Übertragungsspannung von 380 kV für den Endverbraucher viel zu hoch ist, muss die Spannung schrittweise auf die Niederspannung von 400 V/230 V heruntertransformiert werden (Bild 2).

4.5.2 Spannungsebenen

In modernen Stromnetzen unterscheidet man vier Spannungsebenen: Höchstspannungsnetz, Hochspannungsnetz, Mittelspannungsnetz und Niederspannungsnetz.

Das **Höchstspannungsnetz** dient zum Transport des in Kraftwerken erzeugten Stromes über große Entfernung. Die Spannung in diesem Netz beträgt 220 kV bzw. 380 kV. Über dieses Netz sind die Länder der EU untereinander verbunden (Europäisches Verbundnetz). Für HGÜ (Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung) werden auch Spannungen von 500 kV bzw. 750 kV verwendet.

Über das **Hochspannungsnetz** werden größere Gebiete, z. B. das Stadtgebiet von Stuttgart, und auch die Großindustrie versorgt, z. B. die Firma BSW (Badische Stahlwerke). Die Spannung beträgt z. B. 110 kV.

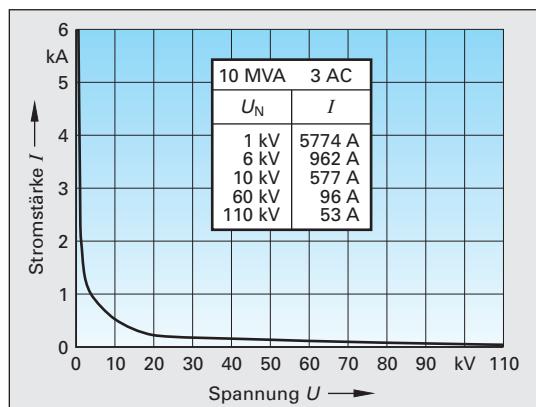


Bild 1: Stromstärken bei Drehstrom für 10 MVA

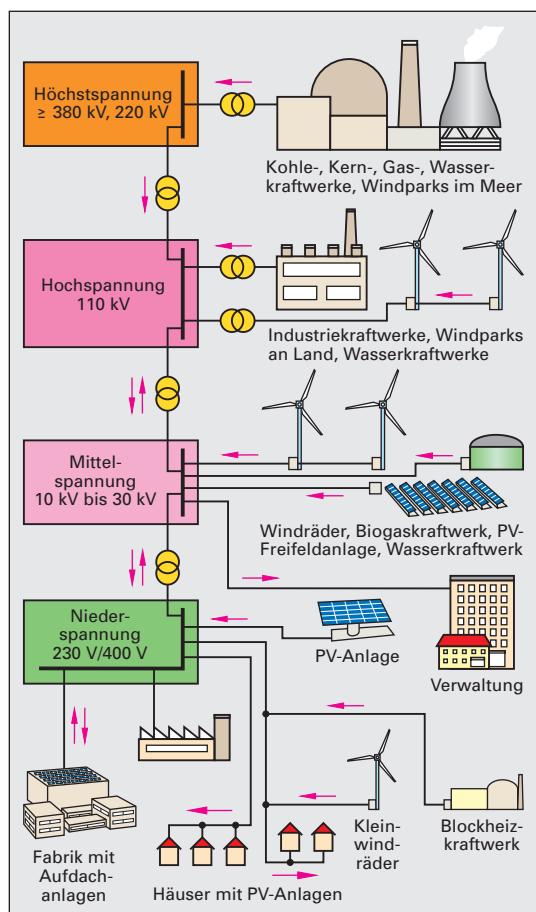


Bild 2: Spannungsebenen der Stromversorgung

Der Energiebedarf erfolgt entweder aus Kraftwerken, die nicht in das Höchstspannungsnetz einspeisen, oder über Umspannwerke aus dem 380-kV-Netz bzw. 220-kV-Netz.

Mittelspannungsnetze haben eine Spannung von 10 kV bis 30 kV. Sie werden meist über Umspannwerke aus dem 110-kV-Netz gespeist. Diese Umspannwerke befinden sich innerhalb der Stadtgebiete und sind meist als Innenraumschaltanlage oder aber als Freiluftschaltanlage ausgeführt. Durch die relativ kleine Spannung von z.B. 10 000 V können auch Industriebetriebe über kundeneigene Stationen direkt versorgt werden. Über Ortsnetzstationen wird die elektrische Energie in Stadtteilen oder Ortschaften auf Niederspannung (400 V/230 V) transformiert und in das Niederspannungsnetz eingespeist.

Die vierte Ebene ist das Niederspannungsnetz mit 400 V/230 V. Über dieses Netz werden Gebäude oder Haushalte mit Strom versorgt. Das zugehörige Verteilungsnetz kann im Erdreich als Kabelnetz aber auch im Freien als Freileitungsnetz aufgebaut sein.

Wiederholung und Vertiefung:

1. Warum muss zum Transport von elektrischer Energie über längere Strecken die Spannung heraufgesetzt werden?
2. Welche anderen Möglichkeiten gibt es, um a) die Verlustleistung auf Leitungen gering zu halten und b) warum werden sie beim Stromtransport nicht angewendet?
3. Auf welche Entfernung kann man Strom mit einer 380-kV-Leitung ohne Zwischenstationen transportieren?
4. Nennen Sie die vier Spannungsebenen mit ihrer Netzbezeichnung und geben Sie die jeweilige Netzspannung an.

4.5.3 Umspannwerke

Umspannwerke nennt man auch die Knotenpunkte der Energieverteilung. Sie wandeln durch Transformatoren die elektrische Energie auf die für die Übertragung notwendigen Spannungsebenen um. Zusätzlich erfolgt von Umspannwerken aus die Verteilung auf weitere Streckenabschnitte durch Schalter.

Umspannanlagen

Umspannanlagen sind für Hochspannung und Höchstspannung vorgesehen und meist als *Freiluftanlagen* ausgeführt (**Bild 1**).

Die einzelnen Betriebsmittel wie Trennschalter und Leistungsschalter der Umspannanlagen sind an Schaltgerüsten befestigt.

Stromwandler und Spannungswandler sowie Umspanner werden auf Sockeln befestigt.

Die Leiterseile der Hochspannungsleitungen werden an einem Gerüst abgespannt (**Bild 2**). Die Verbindungsleitungen zwischen zwei Abspanngerüsten bezeichnet man als *Überspannungen*.



Bild 1: Freiluftanlage 110 kV

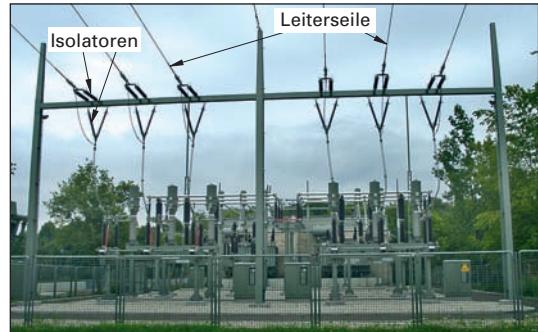


Bild 2: Gerüst zum Abspannen der Leiterseile

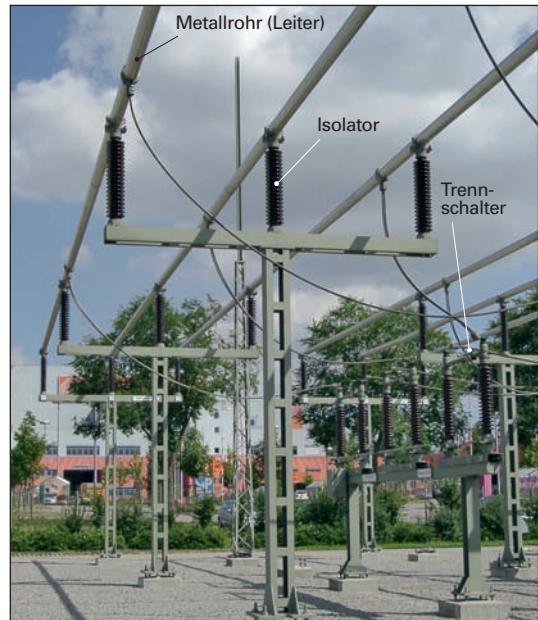


Bild 3: Sammelschienensystem

Meist verlaufen unterhalb der Überspannungen Sammelschienensysteme (**Bild 3**). Die einzelnen Leitungen können über Sammelschienen miteinander verbunden werden. Anstelle von Leiterseilen werden in Umspannwerken meist Metallrohre als Leiter verwendet.

Mithilfe von Trennschaltern (Trennern) oder von Leistungsschaltern kann man die Leitung von Umspannwerken trennen.

Trennschalter dürfen nur ohne Last geschaltet werden.

Das Schalten erfolgt meist von der Steuerwarte aus. Die Trenner können aber auch von Hand betätigt werden.

In dicht besiedelten Gebieten werden Umspannwerke meist als Innenraumanlage ausgeführt und vor allem im Mittelspannungsnetz (MS-Netz) bis 30 kV eingesetzt. Auf engstem Raum sind dort Schaltfelder (Zellen) für ankommende und abgehende Kabel, Stromwandler und Spannungswandler, Trennschalter und Lasttrennschalter sowie die Zuleitungen und Ableitungen für den Transfator untergebracht. Da diese Stationen sehr kompakt gebaut sind, nennt man sie auch Kompakt-Umspannstation (**Bild 1**).

Im Freileitungsnetz werden Innenraumanlagen als Turmstation ausgeführt (**Bild 2**). Unterhalb von Öltransformatoren müssen sich Öl-Auffangwannen befinden. Für einzeln stehende Gehöfte oder kleine Häusergruppen erfolgt die Versorgung auch über Maststationen mit Transformatoren von z.B. 10 kV/400 V und 100 kVA (**Bild 3**).

Größere Innenraumanlagen werden meist als gekapselte gasisolierte Schaltanlagen ausgeführt (**Bild 4**). Dabei wird als Gasisolierung Schwefelhexafluorid SF₆ verwendet. Durch das vollständige Kapseln der Kontakte wird das Bedienen ungefährlich, eine Berührung durch das Bedienpersonal ist somit nicht möglich.

Schalter in Hochspannungsanlagen

Man unterscheidet in Hochspannungsanlagen zwischen *Trennschalter*, *Lasttrennschalter* und *Leistungsschalter*. Die Auswahl der Schalter und Anlage erfolgt nach ihrer Bemessungsspannung (Nennspannung) und ihrer erforderlichen Schutzart. Schalter für Hochspannung können mit Feder- speicherantrieb oder elektromotorischem Antrieb ausgestattet sein.

Trennschalter haben die Aufgabe, Anlagenteile, z.B. bei Revisionsarbeiten, sichtbar abzutrennen, um Arbeiten im spannungslosen Zustand gefahrlos durchführen zu können (**Bild 1, folgende Seite**). Dabei sind die fünf Sicherheitsregeln (Seite 379) zu beachten. Das Bedienpersonal kann sich wegen der sichtbaren Trennstelle ständig vom Spannungszustand überzeugen.

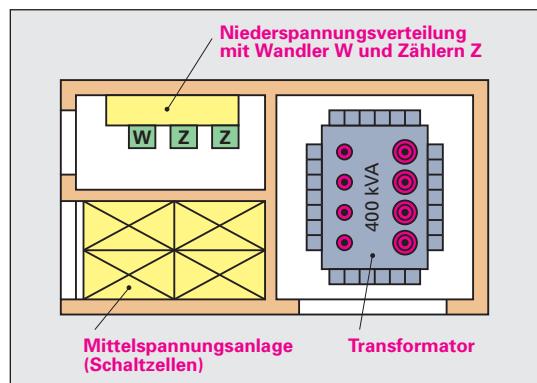


Bild 1: Kompakt-Umspannstation



Bild 2: Turmstation



Bild 3: Maststation



Bild 4: Gasisolierte SF₆-Schaltanlage

5 Verhalten von Transformatoren

5.1 Idealer Transformator

Definition des idealen Transformators

Wir verstehen unter einem idealen Transformator einen Transformator, bei dem keinerlei Verluste auftreten. Der Wirkungsgrad des idealen Transformators ist $\eta = 1$ (η = griech. Kleinbuchstabe Eta), seine Ausgangsleistung ist so groß wie seine Eingangsleistung. Der gesamte magnetische Fluss, welcher die Eingangswicklung durchsetzt, durchsetzt auch die Ausgangswicklung. Eingangswicklung und Ausgangswicklung sind also miteinander magnetisch fest gekoppelt.

Der ideale Transformator ist ein nur als Denkmodell existierender Transformator mit vollständiger magnetischer Kopplung zwischen seinen beiden Wicklungen, bei welchem keinerlei Verluste auftreten.

Unterschiede zwischen idealen Transformator und realem Transformator treten vor allem bei Belastung auf. Dagegen ist die *Leerlaufspannung* beim realen Transformator gleich wie beim idealen Transformator.

Leerlaufspannung

Die Leerlaufspannung ist die Spannung an der Ausgangswicklung mit der Windungszahl N_2 , wenn dort kein Lastwiderstand angeschlossen ist. Die Leerlaufspannung u_0 der Ausgangswicklung ist so groß wie die dort induzierte Spannung u_i .

$$u_0 = N_2 \cdot \Delta\Phi / \Delta t = N_2 \cdot \Delta [\Phi \cdot \sin(\omega t)] / \Delta t \\ = N_2 \cdot \omega \cdot \Phi \cdot \cos(\omega t)$$

Der Scheitelwert der Leerlaufspannung \hat{u}_0 hängt also vom Scheitelwert des magnetischen Flusses Φ bzw. vom Scheitelwert der magnetischen Flussdichte \hat{B} und vom Eisenquerschnitt A des Kernes ab, außerdem von der Kreisfrequenz ω des Eingangsstromes und der Windungszahl N_2 der Ausgangswicklung (Transformatoren-Hauptgleichung).

Der wirksame Eisenquerschnitt ist wegen der Isolierung der Eisenflächen kleiner als der gemessene Kernquerschnitt. Je nach Art der Kernbleche beträgt der Füllfaktor 0,8 bis 0,95. Für Netztransformatoren beträgt der Scheitelwert der magnetischen Flussdichte 1,2 T bis 1,8 T. Für Übertrager wird die Flussdichte so gewählt, dass im geradlinigen Teil der Magnetisierungskurve gearbeitet wird, bei Elektroblech z. B. bei 0,6 T.

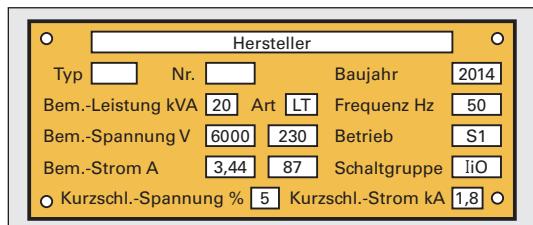


Bild 1: Leistungsschild eines Einphasentransformators

Transformatoren-Hauptgleichung:

$$U_0 = \frac{\hat{u}_0}{\sqrt{2}}$$

$$U_0 = N_2 \cdot 2\pi \cdot f \cdot \hat{B} \cdot A / \sqrt{2}, \quad \frac{2\pi}{\sqrt{2}} = 4,44$$

Leerlaufspannung

$$U_0 = 4,44 \cdot \hat{B} \cdot A \cdot f \cdot N$$

1

U_0 Leerlaufspannung

\hat{B} magnetische Flussdichte (Scheitelwert)

A Eisenquerschnitt

f Frequenz

N Windungszahl

N_2 Windungszahl der Ausgangswicklung

\hat{u}_0 Scheitelwert der Leerlaufspannung

Grundsätzlich kann bei jedem Transformator jede der beiden Wicklungen als Eingangswicklung oder als Ausgangswicklung verwendet werden. Die Transformatoren-Hauptgleichung gilt deshalb auch für die Eingangswicklung.

Beispiel:

Ein Transformator hat einen Eisenkern von $20 \times 20 \text{ mm}^2$. Der Füllfaktor ist 0,9. Die Eingangswicklung hat 1600 Windungen. An welche Spannung darf die Eingangswicklung bei 50 Hz gelegt werden, wenn die magnetische Flussdichte 1,8 T betragen darf?

Lösung:

$$A = 20 \cdot 20 \text{ mm}^2 \cdot 0,9 = 360 \text{ mm}^2 = 0,36 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$U_0 = 4,44 \cdot \hat{B} \cdot A \cdot f \cdot N$$

$$= 4,44 \cdot 1,8 \text{ T} \cdot 0,36 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot 50 \text{ Hz} \cdot 1600 = 230 \text{ V}$$

Aus der oben stehenden *Transformatoren-Hauptgleichung* ist erkennbar, dass die Leerlaufspannung linear mit der Windungszahl ansteigt.

Bei einem Transformator hat die Oberspannungswicklung mehr Windungen als die Unterspannungswicklung.

Bei Transformatoren mit Bemessungsleistungen über 16 kVA wird als Bemessungsspannung die Leerlaufspannung angegeben (Bild 1).

Übersetzungsformeln

Wegen der festen Kopplung beim idealen Transformator sind die Beträge der in der Eingangswicklung und der Ausgangswicklung wirksamen magnetischen Flüsse $\Phi_1 = B \cdot A$ und $\Phi_2 = B \cdot A$ gleich groß. Damit wird

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{4,44 \cdot \hat{B} \cdot A \cdot f \cdot N_1}{4,44 \cdot \hat{B} \cdot A \cdot f \cdot N_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Beim idealen Transformator verhalten sich die Spannungen wie die Windungszahlen.

Übersetzungsverhältnis

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad 1$$

$$\ddot{u} = \frac{U_1}{U_2} \quad 2$$

U_1 Eingangsspannung

U_2 Ausgangsspannung

N_1 Windungszahl der Eingangswicklung

N_2 Windungszahl der Ausgangswicklung

\ddot{u} Übersetzungsverhältnis

Beim idealen Transformator ist die Eingangsleistung S_1 so groß wie die Ausgangsleistung S_2 .

$$S_1 = S_2 \Rightarrow U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2 \Rightarrow I_1/I_2 = U_2/U_1 = N_2/N_1$$

Beim idealen Transformator verhalten sich die Stromstärken umgekehrt wie die Windungszahlen.

Durch Umstellen der Formel erhält man $I_1 \cdot N_1 = I_2 \cdot N_2$. Das Produkt aus Stromstärke und Windungszahl ist die Durchflutung. Deshalb sind beim idealen Transformator die Beträge der eingesetzten und der ausgesetzten Durchflutung immer gleich groß.

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad 3$$

$$\Theta_1 = \Theta_2 \quad 4$$

I_1 Stromstärke der Eingangsseite

I_2 Stromstärke der Ausgangsseite

N_1 Windungszahl der Eingangsseite

N_2 Windungszahl der Ausgangsseite

Θ_1 Durchflutung der Eingangsseite

Θ_2 Durchflutung der Ausgangsseite

Beispiel 1:

Bei einem Transformator hat die Eingangswicklung 300 Windungen, die Ausgangswicklung 1200 Windungen. In der Ausgangswicklung beträgt die Stromstärke 0,5 A. Wie groß ist die Stromstärke in der Eingangswicklung bei einem idealen Transformator?

Lösung:

$$I_1/I_2 = N_2/N_1 \Rightarrow I_1 = I_2 \cdot N_2/N_1 = 0,5 \text{ A} \cdot 1200/300 = 2 \text{ A}$$

Durch Division der Übersetzungsformel für die Spannungen U_1/U_2 durch die Übersetzungsformel für die Stromstärken I_1/I_2 erhält man

$$\frac{U_1 \cdot I_2}{U_2 \cdot I_1} = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{N_1 \cdot N_1}{N_2 \cdot N_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2}$$

Ein idealer Transformator überträgt die angeschlossenen Widerstände im Quadrat des Übersetzungsverhältnisses.

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \frac{N_1^2}{N_2^2} \quad 5$$

$$\frac{Z_1}{Z_2} = \ddot{u}^2 \quad 6$$

Z_1 eingesetzter Scheinwiderstand

Z_2 ausgesetzter Scheinwiderstand

N_1 Windungszahl der Eingangswicklung

N_2 Windungszahl der Ausgangswicklung

\ddot{u} Übersetzungsverhältnis

Beispiel 2:

Ein Transformator hat auf der Eingangsseite 300 Windungen, auf der Ausgangsseite 1200 Windungen. An der Ausgangsseite wird ein Widerstand mit 1000Ω angeschlossen. Mit wieviel Ohm wirkt dieser Widerstand auf der Eingangsseite?

Lösung:

$$Z_1/Z_2 = N_1^2/N_2^2 \Rightarrow Z_1 = Z_2 \cdot N_1^2/N_2^2 = 1000 \Omega \cdot 300^2/1200^2 = 62,5 \Omega$$

In gleicher Weise wie die Scheinwiderstände werden durch einen Transformator Wirkwiderstände, kapazitive Blindwiderstände und induktive Blindwiderstände übertragen. Ein Transformator überträgt also auch Kapazitäten und Induktivitäten, da $C = 1/(\omega X_C)$ und $L = X_L/\omega$.

\ddot{u} Übersetzungsverhältnis

C_1, C_2 Kapazitäten

L_1, L_2 Induktivitäten
(Index 1 für Eingangsseite, Index 2 für Ausgangsseite)

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{1}{\ddot{u}^2} \quad 7$$

$$\frac{L_1}{L_2} = \ddot{u}^2 \quad 8$$

Die oben stehenden Übersetzungsformeln wurden für den idealen Transformator entwickelt. Sie können für reale Transformatoren mit fester magnetischer Kopplung verwendet werden, wenn die Gleichheitszeichen (=) durch Ungefährzeichen (\approx) ersetzt werden.

Mit einem Transformator können Spannungen, Stromstärken, Widerstände, Kapazitäten und Induktivitäten übersetzt werden.

Phasenlage von Eingangsspannung zu Ausgangsspannung

Bringt man die beiden, im gleichen Sinn gewickelten Wicklungen eines Transformators auf den selben Schenkel des Eisenkerns (**Bild 1**), so haben die Ströme in jedem Augenblick entgegengesetzte Richtung, weil die Durchflutungen sich aufheben müssen. Jetzt ist aber die Ausgangswicklung ein Spannungserzeuger. Wenn also zwischen 1.1 und 1.2 der Maximalwert der Eingangsspannung liegt, dann liegt zwischen 2.1 und 2.2 auch der Maximalwert der Ausgangsspannung. Entsprechend besteht in diesem Fall zwischen den Spannungen eine Phasenverschiebung von 0° , wenn die Spannungen zwischen gleichartig liegenden Klemmen gemessen werden, z.B. zwischen der jeweils oberen und der unteren Klemme.

Denkt man sich nun eine Wicklung auf den anderen Schenkel des Eisenkerns geschoben (Bild 1), so beträgt die Phasenverschiebung wie vorher 0° . Es muss jedoch beachtet werden, dass sich nun die Lage der Anschlüsse geändert hat. Wird die Spannung auf beiden Seiten gleichartig gemessen, z.B. von der oberen zur unteren Klemme, so liegt eine Phasenverschiebung von 180° vor.

Je nach Art der Spannungsmessung, des Wickelsinns und der Lage der Wicklungen auf dem Kern kann bei einem idealen Transformator für Einphasenwechselstrom die Phasenverschiebung 0° oder 180° betragen.

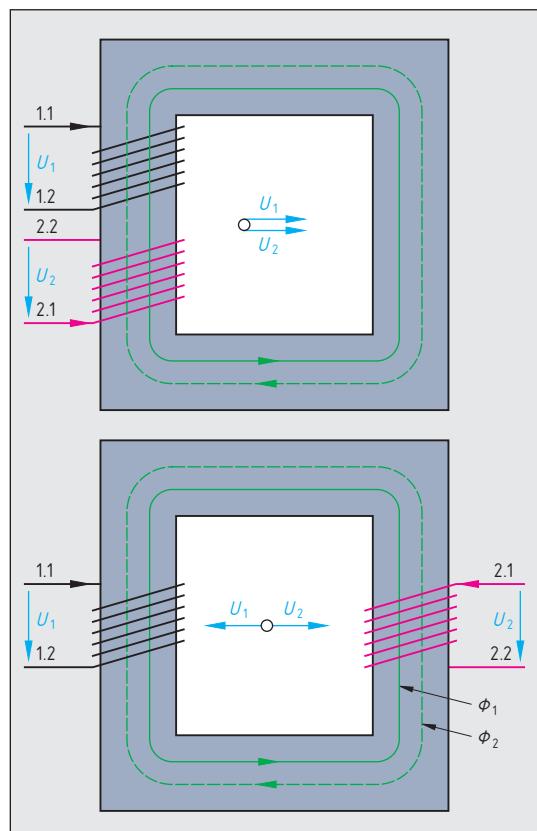


Bild 1: Phasenlagen der Ausgangsspannung zur Eingangsspannung beim Einphasentransformator

Wiederholung und Vertiefung:

1. Was versteht man unter einem idealen Transformator?
2. Welche Transformatoren kommen dem idealen Transformator ziemlich nahe?
3. Wie berechnet man die Leerlaufspannung eines Transformators?
4. In welchem Verhältnis überträgt der ideale Transformator die Widerstände?

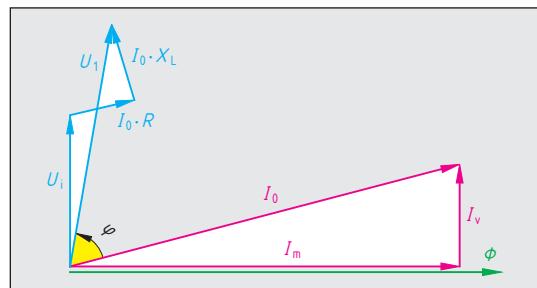


Bild 2: Ströme und Spannungen beim Transformator im Leerlauf

5.2 Realer Transformator im Leerlauf

Leerlauf liegt bei einem Transformator vor, wenn an die Ausgangswicklung kein Lastwiderstand angeschlossen ist. Beim unbelasteten Transformator wirkt die Eingangswicklung wie eine Induktivität, da die Ausgangswicklung stromlos ist und deshalb keine Wirkung hat. Der das magnetische Wechselfeld erzeugende Strom heißt *Magnetisierungsstrom*.

Zwischen dem Magnetisierungsstrom I_m und der Spannung U_1 an der Eingangswicklung besteht wie bei einer Induktivität eine Phasenverschiebung von fast 90° (**Bild 2**).

Der vom unbelasteten, realen Transformator aufgenommene Strom (Leerlaufstrom I_0) hat gegenüber der Spannung U_1 eine etwas kleinere Phasenverschiebung als der Magnetisierungsstrom, da das Ummagnetisieren des Eisens Wärme erzeugt.

Dadurch stellt das Ummagnetisieren eine Belastung mit einem Wirkwiderstand dar. Der Leistungsfaktor im Leerlauf ist etwa 0,1.

Der Transformator im Leerlauf verhält sich wie eine Spule mit einer großen Induktivität.

Das vom Magnetisierungsstrom I_m erzeugte magnetische Wechselfeld induziert in der Eingangswicklung eine Spannung U_i . U_i ist um die von I_0 hervorgerufenen Spannungsfälle im Wirkwiderstand ($I_0 \cdot R$) und im Blindwiderstand ($I_0 \cdot X_L$) größer als U_i (Bild 2, vorhergehende Seite). Da diese Spannungsfälle klein sind, ist $U_1 \approx U_i$.

Wird die Eingangswicklung an eine kleine Spannung gelegt, so wird der Magnetisierungsstrom kleiner und der magnetische Fluss Φ sowie die magnetische Flussdichte B im Eisenkern sinken. Bei einer größeren Spannung nimmt die Flussdichte zu.

Beim Transformator stellen sich der Magnetisierungsstrom und die Flussdichte auf die für die angelegte Spannung erforderlichen Werte ein.

Ein Transformator wird zerstört, wenn er an eine zu große Spannung angeschlossen wird. Die zu große Spannung erfordert eine größere Flussdichte im Kern. Dazu ist ein größerer Magnetisierungsstrom erforderlich. Da der Kern bei der Bemessungsspannung schon annähernd magnetisch gesättigt ist, steigt der Magnetisierungsstrom stark an. Infolgedessen verbrennt die Wicklung.

Zur Erzeugung der magnetischen Flussdichte ist im magnetischen Kreis eine größere Durchflutung erforderlich, wenn die Feldlinien durch Luft gehen. Deshalb nimmt der Magnetisierungsstrom zu, wenn der Luftspalt vergrößert wird. Große Leerlaufströme verursachen Verluste und rufen einen kleinen Leistungsfaktor hervor. Damit bei Transformatoren der Leerlaufstrom klein ist, wird der Eisenkern so geschichtet, dass die Stoßstellen der Bleche sich überlappen.

Kopplung und Kopplungsfaktor

Durchsetzt bei einem Transformator der magnetische Fluss eine Luftstrecke, so durchsetzt er nur noch teilweise die Ausgangswicklung (**Bild 1**).

In der Ausgangswicklung wird dann eine kleinere Spannung erzeugt, als das Übersetzungsverhältnis der Windungszahlen erwarten lässt. Der Ausgangstromkreis ist durch den magnetischen Fluss mit dem Eingangstromkreis nicht mehr vollständig gekoppelt. Ein Maß für die *Kopplung* ist der *Kopplungsfaktor*.

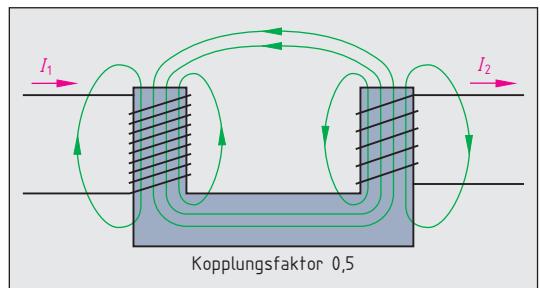


Bild 1: Lose Kopplung

$$K = \frac{U_2/U_1}{N_2/N_1}$$

Kopplungsfaktor

$$K = \frac{U_2 \cdot N_1}{U_1 \cdot N_2}$$

Ausgangsspannung

$$U_2 = K \cdot \frac{U_1 \cdot N_2}{N_1}$$

2

K Kopplungsfaktor

U_1 Eingangsspannung

U_2 Ausgangsspannung

N_1 Windungszahl der Eingangsseite

N_2 Windungszahl der Ausgangsseite

Bei Transformatoren der Energietechnik ist der Kopplungsfaktor fast 1. Dasselbe gilt für Übertrager ohne Luftspalt.

Einschaltstrom

Beim Einschalten von Transformatoren fließen manchmal sehr starke Ströme, auch wenn der Transformator nicht belastet ist. Der Einschaltstrom kann mehr als das Zehnfache des Bemessungsstromes betragen.

Besonders ungünstig ist es, wenn die Netzspannung im Augenblick des Einschaltens gerade null ist und wenn im Eisenkern ein Restmagnetismus zurückblieb, der die gleiche Richtung hat wie der jetzt einsetzende magnetische Fluss. Bei zunehmender Spannung muss sich nämlich der magnetische Fluss ändern, damit in der Eingangswicklung eine gegen die angelegte Spannung wirkende Spannung induziert wird. Hat aber der magnetische Fluss des Restmagnetismus dieselbe Richtung wie der entstehende magnetische Fluss, so ist das Eisen bald gesättigt. Nur sehr große Magnetisierungsströme können jetzt die erforderliche Spannung erzeugen (Abschnitt 5.6).

Der Bemessungsstrom von Sicherungen auf der Eingangsseite von Transformatoren muss mindestens doppelt so groß sein wie der Bemessungsstrom des Transformators.