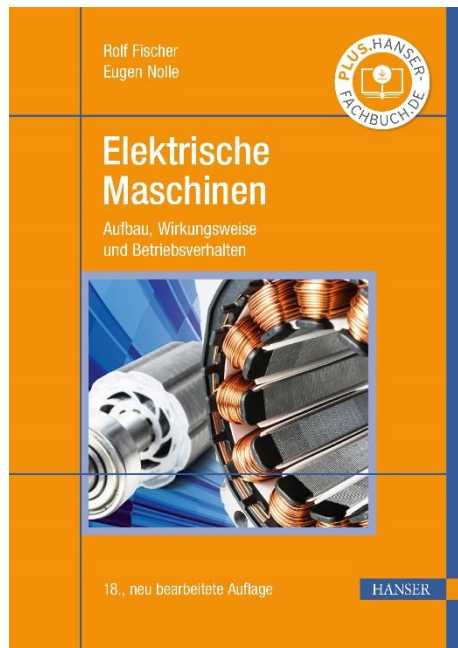


HANSER



Leseprobe

zu

Elektrische Maschinen

von Rolf Fischer und Eugen Nolle

Print-ISBN: 978-3-446-46912-9

E-Book-ISBN: 978-3-446-46938-9

Weitere Informationen und Bestellungen unter

<https://www.hanser-kundencenter.de/fachbuch/artikel/9783446469129>

sowie im Buchhandel

© Carl Hanser Verlag, München

Vorwort

Das vorliegende Buch befasst sich mit Aufbau, Wirkungsweise und Betriebsverhalten der elektrischen Maschinen und Transformatoren. Der Maschinenentwurf wird schon aus Platzgründen nicht behandelt. Dieses nur einen kleineren Leserkreis interessierende Fachgebiet, das heute eng mit der EDV verbunden ist, wäre in einem eigenen Buch darzustellen. Eine Ausnahme wird bei der Auslegung von Dauermagnetkreisen gemacht, da diese Technik auch das Betriebsverhalten der so erregten Maschine beeinflusst und wachsende Bedeutung erlangt. Um dem Leser jedoch Anhaltspunkte für die möglichen spezifischen Belastungen in den Maschinenteilen zu geben, werden der Begriff der Ausnutzungsziffer erläutert und, wo immer sinnvoll, Richtwerte für typische Kenngrößen angegeben.

Stoffauswahl und Umfang wurden nach dem Gesichtspunkt festgelegt, ein vorlesungsbegleitendes Buch für das Studium der elektrischen Maschinen während der Ingenieurausbildung anzubieten. Daneben soll es aber auch dem in der Praxis stehenden Ingenieur bei der Auffrischung und Vertiefung seiner Fachkenntnisse von Nutzen sein. Vorausgesetzt sind die Höhere Mathematik der ersten Semester, die komplexe Rechnung und die allgemeinen Grundlagen der Elektrotechnik.

Auf die Behandlung so spezieller Maschinentypen wie z. B. Drehstrom-Kommutatormaschinen, die keine Bedeutung mehr besitzen, wird verzichtet. Dagegen erhalten die Kleinmaschinen der verschiedenen Bauarten, die wie z. B. Universal- und ec-Motoren in sehr großen Stückzahlen pro Jahr gefertigt werden, in den jeweiligen Hauptkapiteln eigene Abschnitte. Das Gleiche gilt für besondere Bauformen wie die Linearmotoren oder den Turbogenerator großer Leistung.

Besonderer Wert ist auf die Darstellung der Methoden zur Drehzahlsteuerung gelegt, wobei hier eingehend die Verbindungen zur Leistungselektronik gezeigt und die dabei auftretenden Maschinenprobleme behandelt werden.

Zur Kennzeichnung der Größen sind in der Regel die Formelzeichen nach DIN 1304 Teil 1 und Teil 7 verwendet; eine Liste aller Zeichen mit ihrer Bedeutung ist im Anhang enthalten. Bezugspfeile werden bei allen Anschlüssen nach dem Verbraucherpfeilsystem gesetzt. Ein ausführliches Literaturverzeichnis ermöglicht bei vielen Teilgebieten einen ersten Zugang zu weiterführenden, speziellen Veröffentlichungen.

Rolf Fischer und Eugen Nolle

■ Vorwort zur 18. Auflage

In dieser Auflage werden mit

Rolf Fischer und Eugen Nolle

zwei Verfasser benannt. Damit deutet sich eine altersbedingte sukzessive Nachfolge der künftigen Pflege des im Jahr 1971 erstmals im Hanser Verlag erschienen Fachbuches an. Prof. em. Dr.-Ing. Eugen Nolle ist als mein Amtsnachfolger an der Hochschule Esslingen ein ausgezeichnete Fachmann im Bereich der Elektrischen Antriebstechnik mit großer Erfahrung in Lehre und Forschung und damit ein Garant für eine erfolgreiche Fortentwicklung der *Elektrischen Maschinen*.

Dank des stetigen, erfreulichen Interesses an diesem Fachbuch erscheint jetzt eine weitere Auflage. Es bleibt dabei das Bestreben, stets neue Techniken, den Stand der Normung und aktuelle Fragenstellungen aufzunehmen. Für die 18. Auflage wurden neben technischen Korrekturen folgende Neuerungen vorgenommen:

- **Abschnitt 1.2.5: Weichmagnetische Ferrite**
Neben Elektrolechen und Dauermagneten wird ein heute wichtiger dritter Elektromagnetstoff vorgestellt.
- **Abschnitte 2.1.4 und 2.5: ec-Motoren und Universalmotoren**
Beide Maschinenarten beherrschen mit großen Stückzahlen die Technik der Elektrowerkzeuge. Die Behandlung von Universalmotoren wurde als ebenfalls Stromwendertyp den Gleichstrommaschinen zugeordnet und damit Abschnitt 7 für die E-Mobilität freige-macht.
- **Abschnitt 3.4.4: Leistungsübertrager mit Ferritkernen**
Dieser Abschnitt behandelt eine wichtige Anwendung der weichmagnetischen Ferrite.
- **Abschnitt 6.4.4: Synchroner Linearmotoren**
In diesem Abschnitt werden die bislang räumlich getrennt dargestellten Beiträge (in 6.4.3 und 6.4.4) die aber thematisch zusammengehören, erfasst. Neu wird die von der Firma Thyssen-Krupp entwickelte seillose Aufzugstechnik mit einem eisenlosen Langstator-Linearmotor vorgestellt.
- **Kapitel 7: Antriebe für die Elektromobilität**
Der Antrieb durch eine elektrische Maschine ist der zentrale Baustein zwischen den Komponenten Batterie, Leistungselektronik und der Antriebswelle des Motors. Die konträren Forderungen nach möglichst geringer Batteriemasse und hoher Reichweite des Fahrzeugs verlangen eine optimale Auslegung aller Bausteine des Antriebssystems.

Die Verfasser hoffen, dass auch diese 18. Auflage der *Elektrischen Maschinen* das Interesse der Kollegen an den Hochschulen findet. Den Praktikern in Industrie und Gewerbe sowie natürlich allen Studierenden der verschiedenen Ingenieurwissenschaften möge das Buch weiterhin eine verlässliche Hilfe sein. Alle Hinweise und Anregungen werden von jeder Seite sehr dankbar angenommen und nach Möglichkeit integriert.

Die *Elektrischen Maschinen* sind inzwischen aus Leipzig an ihren „Geburtsort“, den Carl Hanser Verlag in München, zurückgekehrt und werden wie in den ersten Jahren dort wieder bestens betreut. Diesmal gilt unser Dank dem Lektorat mit Herrn Frank Katzenmayer und Frau Christina Kubiak.

Inhalt

1	Allgemeine Grundlagen elektrischer Maschinen	11
1.1	Prinzipien elektrischer Maschinen	11
1.1.1	Vorgaben im Elektromaschinenbau	11
1.1.2	Energiewandlung und Bezugspfeile	13
1.1.3	Bauarten und Gliederung elektrischer Maschinen	15
1.1.4	Leistung und Bauvolumen elektrischer Maschinen	18
1.2	Der magnetische Kreis elektrischer Maschinen	20
1.2.1	Aufbau magnetischer Kreise	20
1.2.2	Elektrobleche und Eisenverluste	23
1.2.3	Spannungen und Kräfte im Magnetfeld	26
1.2.4	Der magnetische Kreis mit Dauermagneten	29
1.2.5	Weichmagnetische Ferrite	36
2	Gleichstrommaschinen	39
2.1	Aufbau und Bauteile	40
2.1.1	Prinzipieller Aufbau	40
2.1.2	Bauteile einer Gleichstrommaschine	42
2.1.3	Ankerwicklungen	45
2.1.4	Dauermagneterregte Kleinmaschinen und ec-Motoren	52
2.2	Luftspaltfelder und Betriebsverhalten	56
2.2.1	Erregerfeld und Ankerrückwirkung	56
2.2.2	Spannungserzeugung und Drehmoment	61
2.2.3	Stromwendung	67
2.2.4	Wendepole und Kompensationswicklung	72
2.3	Kennlinien und Steuerung von Gleichstrommaschinen	77
2.3.1	Anschlussbezeichnungen und Schaltbilder	77
2.3.2	Kennlinien von Gleichstrommaschinen	79
2.3.3	Verfahren zur Drehzahländerung	88
2.3.4	Dynamisches Verhalten von Gleichstrommaschinen	96
2.4	Stromrichterbetrieb der Gleichstrommaschine	97
2.4.1	Netzgeführte Stromrichterantriebe	98
2.4.2	Antriebe mit Gleichstromsteller	103
2.4.3	Probleme der Stromrichterspeisung	105
2.5	Universalmotoren	115
2.5.1	Aufbau und Einsatz	115
2.5.2	Ersatzschaltung und Zeigerdiagramm	116

2.5.3	Verfahren der Drehzahländerung	120
2.5.4	Kommutierung	121
3	Transformatoren	125
3.1	Aufbau und Bauformen	126
3.1.1	Eisenkerne von Einphasen- und Drehstromtransformatoren	126
3.1.2	Wicklungen	129
3.1.3	Wachstumsgesetze und Kühlung	130
3.2	Betriebsverhalten von Einphasentransformatoren	139
3.2.1	Spannungsgleichungen und Ersatzschaltung	139
3.2.2	Leerlauf und Magnetisierung	144
3.2.3	Verhalten bei Belastung	149
3.2.4	Kurzschluss des Transformators	153
3.2.5	Transformatorgeräusche	158
3.3	Betriebsverhalten von Drehstromtransformatoren	159
3.3.1	Schaltzeichen und Schaltgruppen	159
3.3.2	Schaltgruppen bei unsymmetrischer Belastung	160
3.3.3	Direkter Parallelbetrieb	165
3.3.4	Regelbare Ortsnetztransformatoren (RONT)	168
3.4	Sondertransformatoren	169
3.4.1	Änderung der Übersetzung und der Strangzahl	169
3.4.2	Kleintransformatoren und Messwandler	171
3.4.3	Spartransformatoren und Drosselspulen	172
3.4.4	Leistungsübertrager mit Ferritkernen	178
4	Allgemeine Grundlagen der Drehstrommaschinen	182
4.1	Drehstromwicklungen	182
4.1.1	Ausführungsformen von Drehstromwicklungen	182
4.1.2	Wicklungsfaktoren	186
4.2	Umlaufende Magnetfelder	193
4.2.1	Durchflutung und Feld eines Wicklungsstranges	193
4.2.2	Drehfelder	196
4.2.3	Blindwiderstände der Drehstromwicklung	205
4.2.4	Spannungserzeugung und Drehmoment	207
4.3	Symmetrische Komponenten	210
4.3.1	Drehstromsystem	210
4.3.2	Zweiphasensystem	214
5	Asynchronmaschinen	217
5.1	Aufbau und Wirkungsweise	218
5.1.1	Ständer und Läufer der Asynchronmaschine	218
5.1.2	Asynchrones Drehmoment und Frequenzumformung	219
5.1.3	Drehtransformatoren	225
5.2	Darstellung der Betriebseigenschaften	227
5.2.1	Spannungsgleichungen und Ersatzschaltung	227
5.2.2	Einzelleistungen und Drehmoment	230
5.2.3	Stromortskurve	238
5.2.4	Betriebsbereiche und Kennlinien	250
5.2.5	Drehmomente und Kräfte der Oberfelder	252

5.3	Steuerung von Drehstrom-Asynchronmaschinen	261
5.3.1	Verfahren zur Drehzahländerung	261
5.3.2	Ersatzschaltung und Betrieb mit frequenzvariabler Spannung	269
5.3.3	Anlass- und Bremsverfahren	280
5.3.4	Unsymmetrische Betriebszustände	290
5.3.5	Dynamisches Verhalten von Asynchronmaschinen	296
5.4	Stromrichterbetrieb von Asynchronmaschinen	299
5.4.1	Spannungsänderung mit Drehstromstellern	300
5.4.2	Untersynchrone Stromrichter-Kaskade	305
5.4.3	Einsatz von Frequenzumrichtern	310
5.4.4	Motorrückwirkungen bei Umrichterbetrieb	316
5.5	Spezielle Bauformen und Betriebsarten der Asynchronmaschine	319
5.5.1	Stromverdrängungs- und Doppelstabläufer	319
5.5.2	Linearmotoren	322
5.5.3	Asynchrongeneratoren	326
5.5.4	Die elektrische Welle	329
5.5.5	Doppeltgespeiste Schleifringläufermotoren	330
5.5.6	Energiesparmotoren mit Wirkungsgrad-Klassifizierung	332
5.6	Einphasige Asynchronmaschinen	338
5.6.1	Einphasenmotoren ohne Hilfswicklung	338
5.6.2	Einphasenmotoren mit Kondensatorhilfswicklung	340
5.6.3	Einphasenmotoren mit Widerstandshilfswicklung	346
5.6.4	Der Drehstrommotor am Wechselstromnetz	349
5.6.5	Spaltpolmotoren	353
6	Synchronmaschinen	356
6.1	Aufbau der Synchronmaschine	357
6.1.1	Bauformen	357
6.1.2	Erregersysteme	361
6.1.3	Synchronmaschinen mit Dauermagneterregung	364
6.1.4	Synchronmaschinen mit Zahnpulenwicklungen	367
6.2	Betriebsverhalten der Vollpolmaschine	369
6.2.1	Erregerfeld und Ankerrückwirkung	369
6.2.2	Zeigerdiagramm und Ersatzschaltung	374
6.2.3	Synchronmaschinen im Alleinbetrieb	375
6.2.4	Synchronmaschinen im Netzbetrieb	385
6.2.5	Besonderheiten der Schenkelpolmaschine	393
6.3	Verhalten der Synchronmaschine im nichtstationären Betrieb	401
6.3.1	Drehzahlsteuerung und Stromrichterbetrieb	401
6.3.2	Pendelungen und unsymmetrische Belastung	405
6.3.3	Die Synchronmaschine in Zweiachsendarstellung	408
6.3.4	Stoßkurzschluss	413
6.4	Spezielle Bauarten von Synchronmaschinen	418
6.4.1	Turbogeneratoren	418
6.4.2	Die Einphasen-Synchronmaschine	420
6.4.3	Betriebsverhalten dauermagneterregter Synchronmotoren	421
6.4.4	Synchrone Linearmotoren	423
6.4.5	Transversalflussmotoren	429

6.5	Synchrone Kleinmaschinen	434
6.5.1	Reluktanzmotoren	434
6.5.2	Hysteresemotoren	438
6.5.3	Schrittmotoren	440
7	Antriebe für die Elektromobilität	445
7.1	Einführung	445
7.1.1	Aktuelle Situation	445
7.1.2	Konzepte der Elektrofahrzeuge	446
7.2	Der elektrische Antriebsstrang	447
7.2.1	Gesamtkonzept eines Elektrofahrzeuges	447
7.2.2	Momentverlauf und Drehzahlniveau der elektrischen Maschine ..	448
7.3	Hauptkomponenten des elektrischen Antriebsstranges	449
7.3.1	Energiespeicher	449
7.3.2	Leistungselektronik	451
7.3.3	Elektrische Maschine	452
7.3.4	Getriebe, ggf. mit Differential	456
7.3.5	Fahrzeug	457
7.3.6	Übergeordnete Steuerung	457
7.4	Quantitative Beschreibung von Fahrsituationen	458
7.4.1	Kinematische Grundgleichungen	458
7.4.2	Stationärer Fahrbetrieb	459
7.4.3	Dynamischer Fahrbetrieb, quasistationäre Fahrsituation	462
7.5	Download-Material zu Kapitel 7	466
8	Betriebsbedingungen elektrischer Maschinen	467
8.1	Elektrotechnische Normung und Vorschriften	467
8.2	Bauformen und Schutzarten	471
8.3	Explosionsgeschützte Ausführungen	474
8.4	Verluste, Erwärmung und Kühlung	477
8.5	Betriebsarten und Leistungsschildangaben	483
8.6	Motoren für drehzahlgeregelte Antriebe	489
9	Anhang	491
	Formelzeichen und Einheiten	491
	Berechnung der Aufgaben	496
	Literatur	504
	Index	513

1

Allgemeine Grundlagen elektrischer Maschinen

■ 1.1 Prinzipien elektrischer Maschinen

1.1.1 Vorgaben im Elektromaschinenbau

Bedeutung und Vorgaben. Elektrische Maschinen sind in der Ausführung als

- Generatoren die Grundlage fast der gesamten Erzeugung elektrischer Energie in Wärme-, Wasser- und Windkraftanlagen eines Landes.
- Motoren ein entscheidendes Betriebsmittel aller Produktion in Industrie und Gewerbe sowie Bestandteil vieler Konsumgüter.

Der Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. (ZVEI) gibt für das Jahr 2005 ein Produktionsvolumen für das gesamte Gebiet der elektrischen Antriebstechnik im Wert von ca. 6,8 Milliarden Euro an. Darin sind die verschiedenen Bereiche mit den folgenden Anteilen beteiligt:

36,8% - Kleinmotoren

26,6% - Drehstrommotoren

19,3% - Antriebsstromrichter

15,8% - Sonstige Motoren, Zubehör

1,5% - Gleichstrommaschinen

Nimmt man die Kraftwerkstechnik hinzu, so entsteht vom winzigen Schrittmotor in einer Quarzuhr mit einer Leistung von ca. 10 μ W bis zu den größten Drehstromgeneratoren von über 1000 MW eine geschlossene Leistungsreihe von 14 Zehnerpotenzen. Dazwischen liegen mit Stückzahlen von meist mehreren Millionen pro Jahr die Kleinmaschinen der verschiedenen Bauarten, wie z. B. die dauermagneterregten Gleichstrom-Hilfsantriebe im Kfz oder die Universalmotoren in Elektrowerkzeugen oder Hausgeräten. Industrieantriebe werden heute fast immer als Drehstrommotoren listenmäßig bis etwa 1000 kW angeboten, darüber hinaus fertigt man Sondermotoren bis ca. 30 MW. Auch bei Generatoren reicht die Fertigung von Millionen Lichtmaschinen pro Jahr über autarke, transportable Stromversorgungsanlagen (Notstromaggregate) ab einigen kVA, über Generatoren für Windrotoren, Blockheizkraftwerke und Staustufen in Flüssen bis in den MVA-Bereich und zu Großmaschinen für Wasser- und Wärmekraftwerke.

Beim Bau von elektrischen Maschinen muss der Entwickler eine Vielzahl von Normen und Vorschriften beachten. Sie betreffen die zulässige Ausnutzung der verwendeten Materialien, einzelne Betriebsdaten und vor allem auch die äußere Gestaltung. Diese Vorgaben sind heute fast alle Inhalt von Europeanormen EN und werden in Kapitel 8 zumindest in den Grundzügen aufgeführt. In Bild 1.1 sind die wichtigsten Vorgaben im Bezug zur Maschine dargestellt.

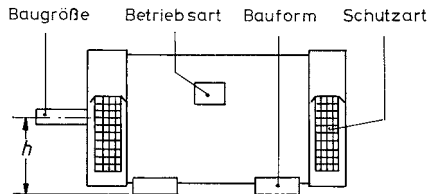


Bild 1.1 Vorgaben im Elektromaschinenbau

Baugröße. Zur Vereinheitlichung von Anbaumaßen und damit einer allgemeinen Austauschbarkeit werden vor allem die Industrieantriebe der Serienfertigung nur in abgestuften Baugrößen gefertigt. Als Bezugswert gilt die Achshöhe h in Abstufungen von 56 mm bis zu etwa 450 mm. Bei Drehstrommaschinen sind mit dem IEC-Normmotor auch weitere Anbaumaße festgelegt. Ausgenommen von dieser Vereinheitlichung von Anbaumaßen sind vielfach Kleinmotoren, wenn sie für einen vorbestimmten Einsatz z.B. in einem Kfz oder einem Hausgerät vorgesehen sind.

Bauform. Je nach Anwendung benötigt man Maschinen mit unterschiedlicher Anbaumöglichkeit, wie z.B. mit normaler Fußbefestigung oder einem Flanschanschluss. Die hier vorhandenen Unterscheidungen definiert die Bauform nach EN 60034-7. Die jeweilige Ausführung wird durch einen Code aus Buchstaben und Zahlen wie IM B3 (International Mounting) gekennzeichnet.

Schutzart. In der Normreihe EN 60034-5 werden Anforderungen an die Gehäuseausführung festgelegt, die den Schutzzumfang vor Berühren unter Spannung stehender Maschinenteile und das Eindringen von Fremdkörpern und Wasser definieren. Je nach Einsatzfall der Maschine ist ein bestimmter Schutzgrad einzuhalten, der durch die Kombination der Buchstaben IP (International Protection) mit zwei Zahlen, z.B. IP21, beschrieben wird.

Betriebsart. Mit den Vorschriften EN 60034-1 bzw. VDE 0530 Teil 1 werden zwischen Dauerbetrieb S1 und Kurzzeitbetrieb S2 zehn verschiedene Belastungsarten einer elektrischen Maschine geregelt. In keinem Fall darf die Erwärmung der Wicklungen eine der Wärmeklasse der eingesetzten Isoliermaterialien zugeordnete Höchsttemperatur überschreiten. Ferner gibt es Grenzwerte für zulässige Kurzschlussströme, Hochlaufmomente und Oberschwingungen.

Leistungsschild. Eine elektrische Maschine erhält – ausgenommen sind wieder Kleinantriebe – ein Leistungsschild, das dem Anwender alle erforderlichen Betriebsdaten angibt. Dies sind vor allem die Werte für den Bemessungsbetrieb wie: Betriebsart S, Abgabeleistung P_N , Spannung U_N , Strom I_N , Leistungsfaktor $\cos \varphi$, Drehzahl n_N . Drehmoment und Wirkungsgrad werden nicht angegeben, da sie aus den vorstehenden Angaben zu berechnen sind.

1.1.2 Energiewandlung und Bezugspfeile

Rotierende Energiewandler. Rotierende elektrische Maschinen sind Energiewandler, die eine Umformung zwischen elektrischer und mechanischer Energie vornehmen. Die Leistung wird auf der einen Seite durch die Größen elektrische Spannung U und Strom I , auf der anderen durch das Drehmoment M und die Drehzahl n bestimmt. In Bild 1.2 ist dieses Prinzip der Energiewandlung schematisch dargestellt. Betrachtet man den stationären Betriebszustand, so gilt die Leistungsbilanz

$$P_{\text{mech}} = P_{\text{el}} \pm P_{\text{v}} \quad (1.1)$$

mit dem Minuszeichen für den Motorbetrieb. Die Umwandlungsverluste P_{v} , die von den Betriebsgrößen U , I und n abhängen, werden in jedem Fall in Wärme umgesetzt und sind damit verloren.

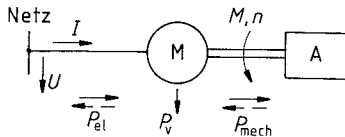


Bild 1.2 Elektrische Maschine M als Energiewandler
A Arbeitsmaschine/Antrieb – Motor – – – Generator

Die mechanische Wellenleistung errechnet sich aus

$$P_{\text{mech}} = 2\pi \cdot n \cdot M \quad (1.2)$$

Für die elektrische Leistung gilt allgemein

$$P_{\text{el}} = m \cdot U \cdot I \cdot \lambda \quad (1.3)$$

wobei U und I die Wicklungswerte der Maschine mit der Strangzahl m sind. Die mechanische Leistung steht beim Motor zur Versorgung der angekuppelten Arbeitsmaschine A zur Verfügung und ist bei Generatorbetrieb die erforderliche Antriebsleistung. Der Leistungsfaktor

$$\lambda = g_1 \cdot \cos \varphi \quad (1.4)$$

erfasst mit dem Verschiebungsfaktor $\cos \varphi$ die Phasenlage von Strom und Spannung bei Wechselstrom- und Drehstrommaschinen. Der Grundswingungsgehalt g_1 berücksichtigt mögliche Oberschwingungen im Stromverlauf. Für Gleichstrommaschinen ist motorseitig $m = 1$ und $\lambda = 1$ zu setzen.

Das Verhältnis von Abgabe- und Aufnahmeleistung wird als Wirkungsgrad des Energiewandlers nach

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \tag{1.5}$$

bezeichnet. Im Motorbetrieb ist $P_1 = P_{el}$ und $P_2 = P_{mech}$ einzusetzen.

Zur Ermittlung der Verluste und des Wirkungsgrades elektrischer Maschinen gibt die VDE-Bestimmung 0530 Teil 2 für Gleich- und Drehstrommaschinen spezielle Mess- und Berechnungsverfahren an.

Statische Energiewandler. Transformatoren und die Schaltungen der Stromrichtertechnik sind ruhende Energiewandler, welche die elektrische Energie auf ein anderes Spannungsniveau bringen (Transformatoren) oder die Stromart ändern (Stromrichter). Da hier bewegte Teile fehlen, entstehen keine Reibungsverluste und im Fall des Transformators kann ohne Luftspalt ein optimaler magnetischer Kreis ausgeführt werden. Transformatoren und bei Stromrichterschaltungen vor allem die Gleichrichter besitzen daher hohe Umwandlungswirkungsgrade (Bild 1.3), welche die von rotierenden Maschinen vor allem bei kleinen Leistungen deutlich übertreffen. So erreichen Großtransformatoren bei rein ohmscher Belastung Werte von über 99 %.

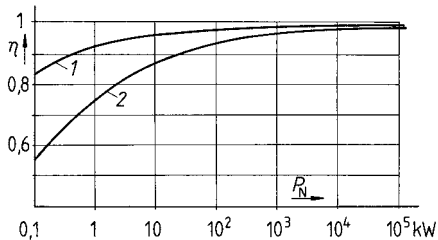


Bild 1.3 Wirkungsgrade rotierender und statischer Energiewandler

- 1 Stromrichter, Transformatoren
- 2 Rotierende elektrische Maschinen

Bezugspfeile. Zur Berechnung eines elektrischen Stromkreises müssen für den Strom I und die Spannung U je eine positive Bezugsrichtung gewählt werden. In diesem Buch wird dazu ausschließlich das Verbraucherpfeilsystem verwendet, was den Vorteil hat, dass beim Übergang vom Motor- in den Generatorbetrieb einer Maschine keine neue Festlegung des Stromzeigers erfolgen muss.

Bei einer Vierpolschaltung wie in Bild 1.4 wird diese Pfeilanordnung auf beide Klemmenpaare angewandt, auch wenn wie z.B. bei einem Transformator stets eine Seite Energie abgibt. Dies äußert sich wie bei Generatorbetrieb einer Maschine im Zeigerdiagramm dadurch, dass die Wirkkomponente des betreffenden Stromes in Gegenphase zu seiner Spannung liegt.

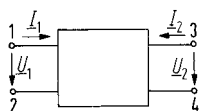


Bild 1.4 Anwendung des Verbraucher-Pfeilsystems auf einen Vierpol (Zweitor)

Art und Richtung der elektrischen Energie sind damit durch die Lage des Stromzeigers \underline{I} in Bezug zur Spannung \underline{U} im Koordinatensystem von Bild 1.5 eindeutig festgelegt. Benachbarte Quadranten stimmen in je einer Charakteristik überein. Bei einem Verbraucher liegt der Stromzeiger in den Quadranten 1 oder 2, bei Energieabgabe unterhalb der imaginären Achse (j -Achse). Bei der Bewertung von Blindleistungen wird auf die Unterscheidung induktiv oder kapazitiv verzichtet und stattdessen von der Aufnahme oder Abgabe von (induktiver) Blindleistung gesprochen. Eine Spule nimmt damit Blindleistung auf, ein Kondensator gibt sie ab.

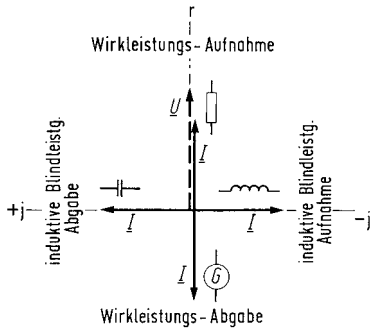


Bild 1.5 Festlegung der Belastungsart im Koordinatensystem für das Verbraucherpeilsystem

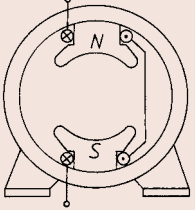
1.1.3 Bauarten und Gliederung elektrischer Maschinen

Konstruktionsprinzipien. Für den prinzipiellen Aufbau von Ständer (Stator) und Läufer (Rotor, Anker) von elektrischen Maschinen gibt es jeweils nur einige wenige grundsätzliche Ausführungen. Sie sind in Tabelle 1.1 angegeben und führen in ihrer Kombination zu den aufgeführten Hauptmaschinentypen.

Tabelle 1.1 Konstruktionsprinzipien elektrischer Maschinen

	Läufer mit	Käfigwicklung	Drehstromwicklung mit Schleifringen	Einzelpole (auch Dauermagnete)	Stromwenderwicklung
Ständer mit					
Drehstromwicklung		Asynchron-Käfigläufer-Motor	Asynchron-Schleifringläufer-Motor	Innenpol-Synchronmaschine	Drehstrom-Kommutator-Maschine

Tabelle 1.1 Konstruktionsprinzipien elektrischer Maschinen (Fortsetzung)

Einzelpole auch als Dauermagnete 	Spaltpolmotor	Außenpol-Synchronmaschine	Schrittmotor	Gleichstrom-Maschine
---	---------------	---------------------------	--------------	----------------------

Bauarten. Eine Gliederung der elektrischen Maschinen kann einerseits nach der verwendeten Stromart wie Gleichstrom-, Wechselstrom- oder Drehstrommaschinen, aber auch nach der Wirkungsweise wie Asynchron- oder Synchronmaschinen oder mit Stromwenderwicklung erfolgen. Innerhalb dieser Haupttypen gibt es meist eine ganze Reihe spezieller Bauarten, die sich in einem bestimmten Leistungs- oder Anwendungsbereich durchgesetzt haben: Tabelle 1.2 zeigt eine Zusammenstellung der elektrischen Maschinen im Rahmen dieser beiden Gliederungen. Dabei ist auch noch der früher als drehzahl geregelter Antrieb eingesetzte Drehstrom-Stromwendermotor aufgeführt. Alle angegebenen Maschinentypen werden in den verschiedenen Abschnitten des Buches besprochen. Die in Tabelle 1.2 angegebenen Anwendungsbereiche und Leistungen sind dabei nur als Schwerpunkte zu verstehen.

Hinweis: Die in Tafel 1.2 angegebenen Einsatzgebiete vor allem für Stromwendermaschinen sind durch die Entwicklung der Leistungselektronik eher historisch. So sind z. B. große Gleichstrommotoren in Walzwerken und Förderanlagen inzwischen durch umrichtergesteuerte Drehstromantriebe abgelöst; das Gleiche gilt für Werkzeugmaschinen und die heutigen Bahnmotoren.

Tabelle 1.2 Gliederung und Einsatz elektrischer Maschinen

Stromart	Stromwendermaschine	Asynchronmaschine	Synchronmaschine	Haupteinsatzgebiete	Leistungsbereich des Maschinentyps
Gleichstrom	Dauermagnetmotor			Feinwerktechnik, Kfz-Elektrik, Servoantriebe	< 1 W bis 10 kW
	Fremderregter Motor			Hauptantrieb für Werkzeugmaschinen, Hebezeuge, Prüffelder, Walzwerke	10 kW bis 10 MW
	Reihenschlussmotor			Anlasser im Kfz, Fahrmotor in Bahnen	300 W bis 500 kW

Tabelle 1.2 Gliederung und Einsatz elektrischer Maschinen (*Fortsetzung*)

Stromart	Stromwendermaschine	Asynchronmaschine	Synchronmaschine	Haupteinsatzgebiete	Leistungsbereich des Maschinentyps
Wechselstrom	Universalmotor			E-Werkzeuge, Haushaltsgeräte	50 W bis 2000 W
	Reihenschlussmotor			Fahrmotor in 16 ² / ₃ -Hz- und 50-Hz-Vollbahnen	100 kW bis 1000 kW
		Spaltpolmotor		Lüfter, Pumpen, Gebläse, Haushaltsgeräte	5 W bis 150 W
		Kondensatormotor		Haushaltsgeräte, Pumpen, Gebläse, Werkzeuge	50 W bis 2000 W
			Hysteresemotor	Uhrwerke, Feinwerktechnik, Hilfsantriebe	< 1 W bis 20 W
			Reluktanzmotor	Gruppenantriebe in der Textilindustrie, Extruder	100 W bis 10 kW
Drehstrom	Nebenschlussmotor (durch Umrichterantriebe abgelöst)			Druck- und Papiermaschinen, Textilindustrie	1 kW bis 150 kW
		Käfigläufermotor		Industriestandardantrieb, z. B. Pumpen, Gebläse, Bearbeitungsmaschinen, Fördertechnik, Umformer, Fahrmotor in Bahnen	100 W bis 50 MW
		Schleifringläufermotor		Hebezeuge, Pumpen und Verdichter	10 kW bis 10 MW
		Linearmotor	Linearmotor	Fördertechnik, Schnellbahnen	100 W bis 10 MW
			Dauermagnetmotor	Servoantriebe, Gruppenantrieb	100 W bis 10 kW
			Schenkelpolmaschine	Notstromgenerator, langsamlaufender Industrieantrieb Wasserkraftgenerator	10 W bis 1000 MW
			Vollpolmaschine	Verdichter-, Mühlenantrieb, Turbogenerator im Kraftwerk	100 kW bis 1500 MW
Impulsstrom			Elektromotor	Feinwerktechnik, Textilindustrie	< 1 W bis 200 W
			Schrittmotor	Quarzuhren, Positionierantrieb	10 μW bis 500 W

1.1.4 Leistung und Bauvolumen elektrischer Maschinen

Nach Gl. (1.20) kann das Drehmoment M einer Maschine über die Tangentialkräfte F am Läufer mit dem Durchmesser d bestimmt werden. Führen die z Leiter den Strom I , so gilt in Verbindung mit Gl. (1.19)

$$M = F \cdot \frac{d}{2} = \frac{d}{2} \cdot z \cdot \alpha \cdot B \cdot l \cdot I$$

wobei der Polbedeckungsfaktor $\alpha = 0,6$ bis $0,8$ nach Gl. (2.13) den Unterschied zwischen der mittleren Flussdichte innerhalb eines Pols im Vergleich zum Maximalwert B erfasst. Bezieht man den Gesamtstrom aller Leiter $z \cdot I$ auf den Läuferumfang $d \cdot \pi$, so erhält man mit

$$A = \frac{z \cdot I}{d \cdot \pi}$$

eine Strombelag A genannte Größe. Ihr Wert ist von den möglichen Nutabmessungen und damit vom Läuferdurchmesser sowie vom Kühlsystem der Maschine abhängig. Bei Luftkühlung wird etwa der Bereich $A = 100 \text{ A/cm}$ bis 600 A/cm ausgeführt.

Mit Einsetzen des Strombelags in obige Momentenbeziehung ergibt sich für das Drehmoment

$$\boxed{M = 0,5 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot A \cdot B \cdot d^2 \cdot l} \quad (1.6)$$

Das Produkt $d^2 \cdot l$ bestimmt das so genannte Bohrungsvolumen $V_b = d^2 \cdot l \cdot \pi/4$ der Maschine und proportional dazu ihr Gesamtvolumen und letztlich die Baugröße. Damit entstehen die folgenden grundsätzlichen Aussagen:

1. Bei durch die zulässigen thermischen und magnetischen Belastungen des aktiven Materials vorgegebenem Produkt $A \cdot B$ bestimmt allein das gewünschte Drehmoment M_N das Bohrungsvolumen und damit die Baugröße eines Motors.
2. Die einer Baugröße zuzuordnende Leistung P_N wird erst durch die verlangte Drehzahl n_N definiert und steigt proportional mit ihr an.

Maschinen für eine bestimmte Leistung werden also mit höherer Betriebsdrehzahl immer kleiner und leichter. Dieser Zusammenhang hat bei den tragbaren Elektrowerkzeugen zu Werten von $n_N \leq 25000 \text{ min}^{-1}$ geführt.

Mit Gl. (1.2) erhält man die Leistung der Maschine mit

$$P = \pi^2 \cdot \alpha \cdot A \cdot B \cdot d^2 \cdot l \cdot n$$

Um eine spezifische Größe für die Materialausnutzung zu erhalten, definiert man als Ausnutzungsziffer oder Leistungszahl C

$$\boxed{C = \pi^2 \cdot \alpha \cdot A \cdot B} \quad (1.7)$$

Ihre Verknüpfung mit der Leistung der Maschine ergibt

$$\boxed{P = C \cdot d^2 \cdot l \cdot n} \quad (1.8)$$

Die Ausnutzungsziffer ergibt einen ersten Richtwert für das erforderliche Produkt $d^2 \cdot l$ einer geplanten Maschine. Ihr Wert steigt mit der Baugröße, liegt bei Leistungen im Bereich von 1 kW bei etwa 1 kW min/m^3 und erreicht bei wassergekühlten Motoren mit 10 kW min/m^3 das Zehnfache.

Anstelle der Leistungszahl C verwendet man zur Bewertung der Ausnutzung des aktiven Materials häufig auch die auf die Läuferoberfläche bezogene Tangentialkraft und bezeichnet mit

$$\sigma = \frac{F}{d \cdot \pi \cdot l} = \frac{2M}{d^2 \cdot \pi \cdot l}$$

diese Kraft/Flächeneinheit als Drehschub σ . Mit Gl. (1.6) erhält man

$$\boxed{\sigma = \alpha \cdot A \cdot B} \quad (1.9 \text{ a})$$

Zwischen Leistungszahl C und Drehschub σ besteht nach obigen Beziehungen die Zuordnung

$$\boxed{C = \pi^2 \cdot \sigma} \quad (1.9 \text{ b})$$

Gl. (1.8) ist auch der Grund für den Einsatz von Getriebemotoren. Bei Betriebsdrehzahlen von z. B. unter 100 min^{-1} würde das Produkt $d^2 \cdot l$ für eine bestimmte Leistung so groß, dass der Aufwand für ein oft in das Gehäuse integriertes Getriebe zur Reduktion der dann möglichen hohen Motordrehzahl die wirtschaftlichste Lösung ist.



Beispiel 1.1: Für den Entwurf eines Drehstrommotors mit $P = 11 \text{ kW}$, $n = 1447 \text{ min}^{-1}$ kann $C = 2,2 \text{ kW} \cdot \text{min/m}^3$ angenommen werden. Es ist eine langgestreckte Ausführung mit $l = 2 \cdot d$ geplant. Welche Werte müssen Läuferdurchmesser d und Läuferlänge l etwa erhalten?

Nach Gl. (1.8) gilt

$$d^2 \cdot l = \frac{P}{C \cdot n} = \frac{11 \text{ kW}}{2,2 \text{ kW} \cdot \text{min/m}^3 \cdot 1447 \text{ min}^{-1}} = 3,455 \cdot 10^3 \text{ cm}^3$$

Wegen $l = 2 d$ gilt

$$2d^3 = 3,455 \cdot 10^3 \text{ cm}^3, \quad d = 12 \text{ cm} \quad \text{und} \quad l = 24 \text{ cm}$$



Beispiel 1.2: Bei Gleichstrommaschinen erhält man als Ausnutzungskennziffer etwa $C = 6,5 \cdot (A \cdot B)$. Welche Leistung erreicht der in Beispiel 1.4 angegebene kleine Dauermagnetmotor bei $n = 1200 \text{ min}^{-1}$, wenn ein Strombelag von $A = 100 \text{ A/cm}$ zulässig ist

$$\text{Es ist} \quad B_L = \frac{\Phi_L}{A_L} = \frac{0,507 \text{ mV} \cdot \text{s}}{17,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 0,297 \text{ T}$$

$$\text{und damit} \quad C = 6,5 \cdot 10 \frac{\text{kA}}{\text{m}} \cdot 0,297 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = 19,27 \frac{\text{kW} \cdot \text{s}}{\text{m}^3}$$

Mit $d = 4 \text{ cm}$ und $l = 3,5 \text{ cm}$ erhält man als etwaige Leistung

$$P = C \cdot d^2 \cdot l \cdot n = 19,27 \frac{\text{kW} \cdot \text{s}}{\text{m}^3} \cdot (0,04 \text{ m})^2 \cdot 0,035 \text{ m} \cdot 20 \text{ s}^{-1} = 21,6 \text{ W}$$

■ 1.2 Der magnetische Kreis elektrischer Maschinen

1.2.1 Aufbau magnetischer Kreise

Aktiver Eisenweg. Das entsprechend dem Induktionsgesetz in der Form $U_q = B \cdot l \cdot v$ und der Kraftwirkung nach $F = B \cdot l \cdot I$ für die Funktion der elektrischen Maschine erforderliche Magnetfeld der Luftspaltflussdichte B wird bis auf den zwischen Ständer und Läufer nötigen Luftspalt in ferromagnetischem Blech geführt. Nur so lässt sich entsprechend der Grundbeziehung im magnetischen Feld

$$\boxed{B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H} \quad (1.10)$$

durch die hohe relative Permeabilität $\mu_r \gg 1$ von Eisen die von der Magnetisierungswicklung aufzubringende magnetische Feldstärke H in vernünftigen Grenzen halten. Für den Luftspalt, der mit Weiten von teilweise unter 1 mm nur einen sehr kleinen Anteil des geschlossenen magnetischen Weges ausmacht, gilt bei $\mu_r = 1$ die magnetische Feldkonstante

$$\boxed{\mu_0 = 0,4 \cdot \pi \cdot 10^{-6} \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}}} \quad (1.11)$$

Der Aufbau des magnetischen Kreises ist am Beispiel einer vierpoligen Drehstrom-Asynchronmaschine in Bild 1.6 für Ständer und Läufer gezeigt. Der magnetische Fluss Φ

schließt sich auf dem zur Achse 0-5 symmetrischen Weg über Läuferücken - Läuferzähne - Luftspalt - Ständerzähne - Ständerücken. In allen Abschnitten entstehen entsprechend den örtlichen Eisenquerschnitten A_{Fe} nach

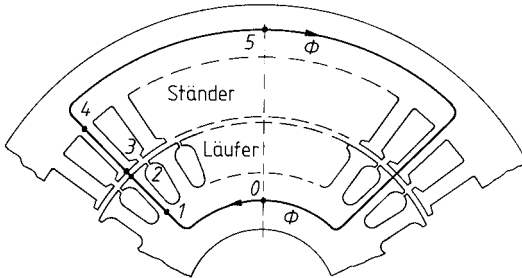


Bild 1.6 Magnetischer Kreis einer Drehstrom-Asynchronmaschine

$$B = \frac{\Phi}{A_{\text{Fe}}} \quad (1.12)$$

unterschiedliche magnetische Flussdichten oder Induktionen B , wobei etwa folgende Richtwerte gelten:

Luftspalt $B_L = 0,6 \text{ T bis } 1,1 \text{ T}$

Zähne $B_z = 1,5 \text{ T bis } 2,1 \text{ T}$

Rücken $B_R = 1,2 \text{ T bis } 1,6 \text{ T}$

Durchflutungsgesetz. Zur Berechnung des magnetischen Kreises werden bei noch feinerer Unterteilung des Feldweges wie in Bild 1.6 die in den einzelnen Abschnitten auftretenden Flussdichten B_i bestimmt und dazu aus der Magnetisierungskennlinie $B = f(H)$ die zugehörige magnetische Feldstärke H_i entnommen. Mit der jeweiligen Weglänge l_i in Feldrichtung erhält man dann die für diese Teilstrecke erforderliche magnetische Spannung

$$V_i = H_i \cdot l_i \quad (1.13)$$

Die Addition aller magnetischer Teilspannungen V_i über den geschlossenen Weg des Feldes Φ ergibt die magnetische Umlaufspannung

$$V_0 = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + H \cdot l_3 + \dots = \sum_{i=1}^{i=n} H_i \cdot l_i = \Theta \quad (1.14 \text{ a})$$

Diese Beziehung ist in der Form

$$\Theta = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} \quad (1.14 \text{ b})$$

als Durchflutungsgesetz bekannt.

Die elektrische Durchflutung bestimmt bei einer Gleichstrommaschine das erforderliche Produkt Windungszahl mal Erregerstrom der Hauptpole. Bei Drehstrommaschinen ergibt sich aus der Durchflutung die Höhe des Magnetisierungsstromes in der Drehstromwicklung des Ständers.

Bestimmung magnetischer Felder. Zur bildlichen Beschreibung des magnetischen Feldes eignet sich die Vorstellung von Feldlinien, die an jeder Stelle die Richtung des Vektors \vec{B} festlegen. Die Darstellung wird zum Feldbild, wenn die Dichte der eingetragenen Feldlinien proportional zur örtlichen Flussdichte gewählt wird. Dies ist der Fall, sofern man eine Quadratstruktur zwischen den Feldlinien und den senkrecht dazu liegenden Niveaulinien realisiert. Letztere verbinden Punkte gleicher magnetischer Teilspannung V , wobei eine Eisenoberfläche mit $V = 0$ belegt wird. Das Verfahren führt zu Ergebnissen wie in Bild 1.7 und hatte vor der Einführung der EDV eine große Bedeutung.

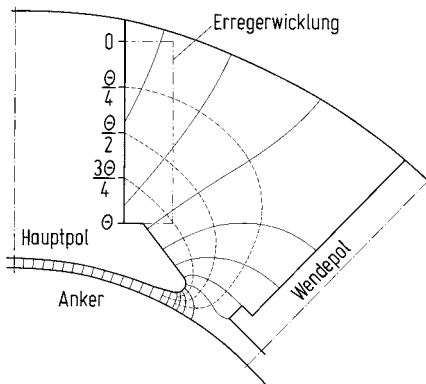


Bild 1.7 Feldbild des Erregerfeldes einer vierpoligen Gleichstrommaschine
– Feldlinien - - - Niveaulinien

Numerische Feldberechnung. Für die Bestimmung von örtlichen Flussdichten im magnetischen Kreis von Maschinen und Geräten verwendet man heute firmeneigene oder auch kommerzielle EDV-Rechenprogramme (PROFI, MAGGY). Sie berücksichtigen die Sättigungsabhängigkeit der magnetischen Daten aller Eisenteile und den Einfluss von Querschnittsänderungen z. B. durch Bohrungen, Nuten oder sonstige Verengungen.

Man überzieht die gegebene Konstruktion wie in der Technik der „Finiten Elemente“ mit einem feinmaschigen Netz, das umso dichter sein muss, je mehr sich die örtliche Flussdichte ändert. Für jedes Element sind die Permeabilität $\mu = f(B)$ oder die Kennlinie $B = f(H)$ des feldführenden Materials anzugeben. Mit Hilfe iterativer Rechenverfahren lässt sich dann über die Verknüpfung der Gleichungen des magnetischen Feldes die Flussdichte B in jedem Element bestimmen. Das Ergebnis kann man z. B. in Form einer geeichten Abstufung von Grautönen oder Farben unmittelbar in die Konstruktionszeichnung übertragen und erhält damit einen direkten optischen Eindruck der magnetischen Ausnutzung des Materials [4, 5].

Eine zweite Möglichkeit besteht darin, sich ein rechnergezeichnetes Feldlinienbild des gesamten magnetischen Kreises zu verschaffen. Bild 1.8 zeigt als Beispiel hierfür das Feldbild eines kleinen zweipoligen Gleichstrommotors mit 16 Ankernuten und Dauermagnet-erregung. Derartige Maschinen werden in der Kfz-Elektrik in großen Stückzahlen für Gebläse, Scheibenwischer usw. verwendet.

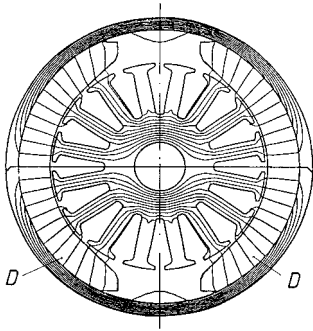


Bild 1.8 Feldbild der Dauermagneten D eines zweipoligen Kleinmotors
Ermittelt mit dem MAGGY-Programm
(Valvo, Philips Bauelemente, Lit. 10)



Beispiel 1.3: Nach Bild 1.6 wird das Magnetfeld eines Motors bis auf den erforderlichen Luftspalt l_L zwischen Ständer und Läufer in Elektroblech geführt. Zwar sind die Flussdichten in den einzelnen Bereichen wie angegeben, unterschiedlich doch wird hier stark vereinfacht einheitlich angenommen: $B_{Fe} = 1,5 \text{ T}$, $l_{Fe} = 40 \text{ cm}$ und $B_L = 0,8 \text{ T}$, Luftspalt $l_L = 0,4 \text{ mm}$

Aus einer Magnetisierungskennlinie ergibt sich $B_{Fe} = f(H_{Fe}) \rightarrow H_{Fe} = 20 \text{ A/cm}$

Für einen Luftspalt gilt $H_{Fe} = B_L / \mu_0 = 0,8 \text{ T} / (0,4 \pi \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am})$ $H_{Fe} = 6400 \text{ A/cm}$

Die Luftstrecke erfordert zum Transport des Magnetfeldes also etwa die 320-fache Feldstärke wie der Eisenweg. Mit obigen Daten erhält man weiter $V_{Fe} = 800 \text{ A}$ und $V_L = 510 \text{ A}$. Obwohl die beiden Luftspalte mit $0,8 \text{ mm}$ nur 2% des Eisenweges ausmachen, benötigt man fast einen gleichgroßen Durchflutungsanteil. Der Luftspalt wird daher bei Drehstrommotoren unter Berücksichtigung von Fertigungstoleranzen, Schwingungen und Geräuschen so gering wie möglich gehalten.

1.2.2 Elektrobleche und Eisenverluste

Elektrobleche. Der zur Aufnahme des Magnetfeldes einer Maschine erforderliche Eisenweg ist, von Gleichstrom-Kleinmotoren abgesehen, stets aus Elektroblechen geschichtet, die mit Nieten, Klammern oder einseitigem Schweißen zu einem so genannten Blechpaket gepresst werden. Handelt es sich wie bei Transformatoren oder Wechselstrommaschinen um ein zeitlich veränderliches Magnetfeld, so ist dieser Aufbau aus $0,23 \text{ mm}$ bis $0,6 \text{ mm}$ starken Blechen zur Reduzierung der Wirbelstromverluste zwingend. Das Material wird bereits am Ende des Walzprozesses durch eine dünne Silikatschicht oder wasserlösliche Lacke einseitig isoliert.

Kaltgewalzte Bleche. Drehstrommaschinen erhalten bis zu mittleren Leistungen ein aus einem Komplettschnitt geschichtetes Blechpaket. Das magnetische Feld wechselt dabei zwischen Rücken und Zähnen seine Richtung um 90° , so dass das verwendete Elektroblech keine magnetische Vorzugsrichtung haben darf. Man verwendet hier kaltgewalzte nicht kornorientierte Blechsorten häufig mit einer anschließenden Schlussglühung zum Abbau von Spannungen, die durch den Stanzvorgang entstehen. Das Gleiche gilt prinzipiell auch für Kleintransformatoren mit einem U- oder E-Schnitt, obwohl hier mitunter auch die nachstehend angesprochenen kornorientierten Qualitäten eingesetzt werden.

Zur Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit und damit der Minderung von Wirbelstromverlusten erhält das Eisen einen bis zu ca. 4%igen Siliziumanteil. Von Nachteil ist dabei, dass mit höherem Si-Gehalt einmal die Sprödigkeit der Bleche zunimmt und vor allem aber die Magnetisierbarkeit – ausgedrückt durch die Polarisation J – abnimmt. Diese Größe bestimmt die allein durch das Eisen erzeugte Flussdichte ohne den Anteil des Luftspaltfeldes der Erregerspule nach der Beziehung $J = B - \mu_0 \cdot H$. Sie ist also ein Maß für die feldverstärkende Wirkung des Eisens.

Die Kennzeichnung der vielen verfügbaren Blechsorten erfolgt durch einen alphanumerischen Code, der die spezifischen Verluste v_{15} bei sinusförmiger Ummagnetisierung mit $B = 1,5 \text{ T}$ und $f = 50 \text{ Hz}$ sowie die Blechstärke d angibt. Als Beispiel sei die Sorte M250-50 A mit $v_{15} = 2,5 \text{ W/kg}$ und $d = 0,5 \text{ mm}$ genannt.

Vor allem für Serienmotoren kleinerer Leistung werden auch Bleche im nicht schlussgeglühten Zustand nach der Norm EN 10126 geliefert. Diese so genannten „semi-processed“ Sorten sind nicht siliziert und haben daher höhere Ummagnetisierungsverluste, aber dafür eine etwas höhere Polarisation. Semi-processed-Bleche werden erst als gestanzter Blechschnitt wärmebehandelt, wonach eine dünne Oxidschicht die Isolierung übernimmt.

Kornorientierte Elektrobleche. Für Eisenkerne von Leistungstransformatoren, in denen das Magnetfeld entlang der Blechstreifen geführt wird, verwendet man ausschließlich kornorientierte, schlussgeglühte Elektrobleche mit Stärken zwischen 0,23 mm bis 0,35 mm. Diese Bleche besitzen eine starke Abhängigkeit der Verlustwerte und der Polarisation von der Magnetisierungsrichtung. Erfolgt diese in Walzrichtung, so betragen die Ummagnetisierungsverluste nur etwa die Hälfte derjenigen bei richtungsunabhängigen Blechen. Ein weiterer Vorteil der kornorientierten Bleche ist der deutlich geringere Magnetisierungsbedarf wieder in Walzrichtung. Die erforderliche Durchflutung für eine bestimmte Flussdichte sinkt gegenüber nicht kornorientierten Blechen etwa um eine Größenordnung. Wie in Bild 1.9 zu erkennen ist, steigen die Verluste und der Magnetisierungsbedarf dagegen bei einer Quermagnetisierung auf ein Mehrfaches der günstigsten Werte an. Dies lässt sich aber durch die Gestaltung des Eisenkerns beim Transformatorrelativ einfach vermeiden [6, 7].

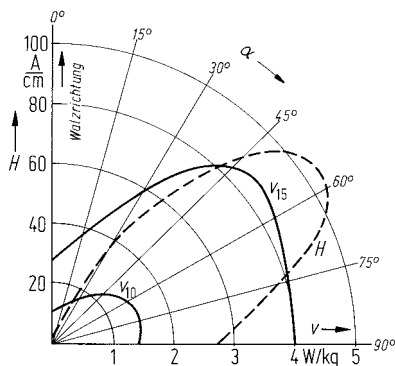


Bild 1.9 Richtungsabhängigkeit der spezifischen Verluste v und der magnetischen Feldstärke H für $B = 1,5 \text{ T}$ bei kornorientierten Elektroblechen α Abweichung von der Walzrichtung

Amorphe Elektrobleche. Schon seit Jahren sind Elektrobleche aus Legierungen von im wesentlichen Eisen, Bor und Silizium bekannt, bei denen durch eine sehr rasche Abkühlung der Schmelze die Ausbildung der sonst üblichen geordneten Kristallstruktur ver-

hindert wird. Es entsteht vielmehr wie bei Glas ein Eisen mit zufälliger, d.h. amorpher Atomanordnung. Der erforderliche schnelle Wärmeentzug gestattet allerdings nur die Herstellung von sehr dünnen Bändern mit Dicken bis derzeit maximal 25 μm .

Amorphe Elektrobleche besitzen eine sehr kleine Koerzitivfeldstärke, was wiederum geringe Ummagnetisierungsverluste bedeutet. Die sehr dünnen Wandstärken der Bänder und ein gegenüber kornorientierten Blechen etwa dreifacher spezifischer ohmscher Widerstand ergeben zudem deutlich kleinere Wirbelstromverluste.

Insgesamt haben Transformatoren mit amorphem Eisenkern damit Leerlaufverluste, die nur etwa ein Drittel der sonst üblichen Werte erreichen. Trotz der erforderlichen Ringkernanordnung der Bleche und einer wegen des Boranteils geringeren Sättigungsflussdichte von ca. 1.65 T – was zu größeren Querschnitten und damit mehr Masse führt – werden im Bemühen um Energieeinsparung inzwischen auch Leistungstransformatoren in Verteilernetzen aus amorphen Eisenkernen eingesetzt. Welche Möglichkeiten der Energieeinsparung sich dabei ergeben, wird in Abschnitt 3.1.3 behandelt.

Magnetisierungskennlinie. Alle ferromagnetischen Materialien zeigen eine starke Abhängigkeit der Permeabilität von der Flussdichte (Induktion) B . Für die praktische Berechnung magnetischer Kreise ist es jedoch zweckmäßiger, anstelle der Permeabilität gleich die Zuordnung $B = f(H)$ in Form einer so genannten Magnetisierungskennlinie anzugeben (Bild 1.10). Mit Beginn der magnetischen Sättigung flachen die Kurven stark ab und streben dem linearen Endverlauf $B = \mu_0 \cdot H$ zu. Die Kennlinien werden in den Katalogen der Blechhersteller nach Qualitäten geordnet angegeben.

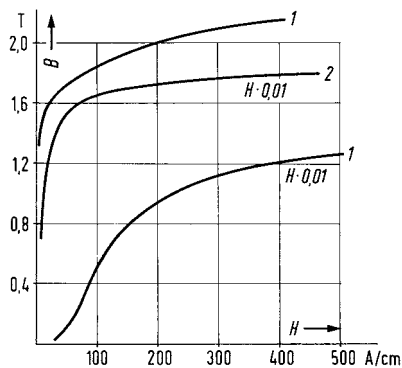


Bild 1.10 Gleichstrom-Magnetisierungskurven
1 Elektroblech 0,5 mm, schlussgeglüht
2 kornorientiertes Blech 0,35 mm

Hystereseverluste. Sie lassen sich vereinfacht als „Reibungswärme der Elementarmagnete“, welche die feldverstärkende Wirkung des Eisens bewirken, erklären. Durch eine Wechsellagerung der Frequenz f erfolgt eine periodische Umorientierung, die Energie benötigt. Es lässt sich zeigen, dass diese pro Zyklus der Fläche der Hystereseschleife des Materials proportional ist. Zwischen dem Flächeninhalt und der erreichten höchsten Flussdichte besteht je nach dem Sättigungsgrad und der Blechsorte die Abhängigkeit $B^{1,6-2,4}$. Für praktische Berechnungen setzt man näherungsweise eine quadratische Zuordnung und erhält für die Hystereseverluste pro Masseneinheit

$$\nu_{\text{H}} = c_{\text{H}} \cdot f \cdot B^2$$

(1.15)

Wirbelstromverluste. Ein Wechselfeld erzeugt in dem durchsetzten Eisen nach dem Induktionsgesetz Spannungen, die innerhalb jedes Bleches einen geschlossenen Stromkreis vorfinden. Auf Grund der relativ guten elektrischen Leitfähigkeit des Eisens entstehen damit über den Querschnitt verteilte Ströme. Die Stromwärme dieser Wirbelströme bezeichnet man als Wirbelstromverluste. Die Spannungen im Eisen ergeben sich zu

$$u \sim \frac{d\Phi}{dt} \sim f \cdot B$$

und die ohmschen Verluste mit

$$P_v \sim \frac{u^2}{r} \sim f^2 \cdot B^2$$

Damit erhält man für die Wirbelstromverluste pro Masseneinheit

$$\boxed{\nu_w = c_w \cdot f^2 \cdot B^2} \quad (1.16)$$

Durch die Blechung des Eisenquerschnitts werden die senkrecht zur Feldrichtung entstehenden Strombahnen auf den schmalen Bereich des Blechquerschnittes beschränkt, was die Verluste stark reduziert.

Eisenverluste. In der Praxis fasst man zur Kennzeichnung einer Blechqualität die spezifischen Wirbelstrom- und Hystereseverluste zu einer Gesamtverlustziffer ν_{10} bzw. ν_{15} zusammen. Bezugsbedingungen für diese Werte sind dabei eine sinusförmige Wechselmagnetisierung mit $B = 1 \text{ T}$ bzw. $1,5 \text{ T}$ bei einer Frequenz von 50 Hz . Die Bestimmung der Verlustziffer erfolgt messtechnisch an genormten Blechproben im so genannten Epsteinapparat.

Bei von den Bezugswerten abweichenden Betriebsgrößen B und f errechnet man die gesamten Eisenverluste der Masse m_{Fe} aus

$$\boxed{P_{\text{Fe}} = m_{\text{Fe}} \cdot \nu_{15} \cdot \left(\frac{B}{1,5 \text{ T}} \right)^2 \cdot k_f \cdot k_B} \quad (1.17)$$

Der Frequenzfaktor k_f berücksichtigt mit der Näherung $k_f = (f/50 \text{ Hz})^{1,6}$ die unterschiedliche Abhängigkeit der Verlustanteile von der Frequenz. Ein Bearbeitungszuschlag $k_B \approx 1,3$ erfasst die Wirkung des Stanzens und anderer Einflüsse.

1.2.3 Spannungen und Kräfte im Magnetfeld

Induktionsgesetz. Das von dem Engländer Michael Faraday 1831 entdeckte Gesetz über die Wirkung zeitlich veränderlicher magnetischer Felder wird bei elektrischen Maschinen mit nachstehender Übersicht in verschiedenen Beziehungen genutzt:

Index

A

Alleinbetrieb 326, 375
AlNiCo-Magnete 30
amorphe Bleche 24
Anker 45
Ankerdurchflutung 59
Ankerquerfeld 59
Ankerrückwirkung 56, 59, 83, 366, 370
Ankerspannung 61
Ankerstellbereich 90
Ankerstrombelag 58
Ankerstrom-Formfaktor 108
Ankerumschaltung 100
Ankervorwiderstände 89
Ankerwicklung 45
Ankerwirkungsgrad 89
Anlassen von Schleifringläufermotoren 280
Anlasswiderstände 94
Anlauf 93
Anlaufkondensatormotor 345
Anschlussbezeichnungen 77
Antriebsstrang 447
Anziehungskräfte 424
Anzugsmoment 343
Arbeitspunkt 32
asynchrone Oberfeldmomente 252
asynchroner Anlauf 402
asynchrones Drehmoment 219
Asynchrongeneratoren 326
Asynchronmaschinen 217
Asynchronmaschinen, Betriebsbereiche 250
Asynchronmaschinen, einphasige 338

Asynchronmaschinen, Stromrichterbetrieb 299
Ausgleichsverbindungen 50
Ausgleichswelle 329
Ausgleichswicklung 163
Aussetzbetrieb 485

B

Barkhausen-Schaltung 120
Bauformen 12, 471
Baugrößen 12, 471
Bauteile Gleichstrommaschine 42
Bearbeitungszuschlag 26
Belastung des Transformators 149
Belastungskurve 251
Bemessungswerte 487
Berührungsschutz 472
Betriebsart 12
Betriebsbedingungen 482
Betriebsdiagramme 90, 273, 387
Betriebskondensatormotor 344
Bewegungsspannung 26, 62, 71
Bezugspfeile 13
Blindlaststeuerung 387
Blindleistung 15
Blockstrom 422
Bohrungsdurchmesser 183
Boostbetrieb 451
Bremsschaltungen des Asynchronmotors 286
Bruchlochwicklungen 186, 192
Bürstenfeuer 69, 123
bürstenlose Erregung 362
Bürstenverschiebung 77, 122

C

Carter-Faktor 57
CE-Kennzeichnung 468
cW-Wert 460

D

Dahlander-Schaltung 267
Dauerbetrieb 484
Dauerkurzschluss 153, 378
Dauermagneten 29
Dauermagneterregung 52, 364
Dauermagnetmotor 402
direkte H₂-Kühlung 418
direkter Anlauf 299
direkter Parallelbetrieb 165
Direktumrichter 404
Doppelkäfigläufer 321
Doppelkondensatormotor 344
Doppelschlussmotoren 85
Doppelstab-Käfigläufer 219
doppeltgespeiste Schleifringläufermotoren 330
Drehfelder 196, 200
Drehfeld-Erregerkurve 196
Drehfeld-Raumdiagramm 224
Drehmoment 18, 28, 40, 64, 86, 207, 209, 219, 231, 390, 398
Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie 81, 118
Drehmoment-Frequenz-Diagramm 444
Drehmomentgleichung 232
Drehmomentmaßstab 245
Drehregler 225
Drehstrom-Asynchronmaschinen, Steuerung 261
Drehstrombank 126, 176
Drehstromkerne 128
Drehstrommaschinen 182
Drehstromsteller 300
Drehstromtransformator 125, 159
Drehstromwicklungen 182
Drehtransformatoren 225
Drehzahländerung 83, 88, 120, 261
drehzahleregelte Antriebe 402
Drehzahlkennlinie 120
Drehzahlstabilität 82

Dreiphasensystem 210
Dreischenkelkern 128
Drosselspulen 172, 176
Durchflutungsgesetz 21
Durchflutungsgleichgewicht 150, 160
Durchgangsleistung 172
Durchmesserwicklung 46, 184
dynamische Antriebsaufgabe 462
dynamischer Fahrbetrieb 462
dynamisches System 457
dynamisches Verhalten 96

E

Eckdrehzahl 449
ec-Motoren 54
Eigenkühlung 483
Einphasen-Kerntransformator 128
Einphasen-Manteltransformator 128
Einphasenmotoren 338
Einphasen-Synchronmaschine 420
Einphasentransformatoren 139
Einschaltströme 297
Einschaltstromstoß 147
Einschichtwicklungen 183
einsträngige Belastung 161
Einzelverluste 477
Eisenkerne 126
Eisen- und Zusatzverlust 279
Eisenverluste 23, 26, 229
Eisenweg 20
elektrische Ausgleichswelle 329
Elektrobleche 23
Elektrofahrzeug 445
Elektromobilität 445
elektronischer Anlasser 283
elektronische Transformatoren 178
EMV 468
Energiebedarf 450
Energierückgewinnung 453, 458
Energiespeicher 446
Energiewandlung 13
Entmagnetisierung 33
Entmagnetisierungsfaktor 31
Entmagnetisierungskurve 29
Erregerfeld 56, 369
Erregerleistung 361

Erregerstrom 379
 Erregersysteme 361
 Erregerwicklung 77, 78, 83
 Ersatzschaltbild 116, 228
 Ersatzschaltung 139, 374, 375
 Erwärmung 478
 Europeanorm 468
 explosionsgeschützte Ausführungen 474

F

Fahranforderung 452
 Fahrmotor 87
 Fahrzeugdynamik 462
 Feldbild 22
 Felderregerkurve 193
 Feldkräfte 28
 Feldkurve 369
 Feldlinien 22
 Feldschwächbereich 274, 277
 Feldschwächung 120
 Feldstellbereich 90
 Feldumkehr 101
 Fernübertragung 125
 Ferrite 30
 Ferritkern 36
 fiktive Zusatzmasse 463
 Flüssigkeitskühlung 419
 Flywheel 451
 Fourieranalyse 179
 Fremderregung 83
 Fremdkörperschutz 473
 Fremdkühlung 483
 Frequenzfaktor 26
 Frequenzumformer 221
 frequenzvariable Spannung 269
 Fünfschenkelkern 129
 Funkstörung 115

G

galvanische Trennung 178
 Ganzlochwicklung 186, 188
 Gasexplosionsschutz 474
 Gegenfeld 201
 Gegenstrombremsung 289
 Gegensystem 211

Geräusche 318
 Geräuschquelle 158
 geschaltete Reluktanzmaschine (SRM) 456
 Gießharzisolierung 138
 Gleichpol-Bauweise 441
 Gleichstrombremsung 286
 Gleichstrom-Erregermaschine 361
 Gleichstrommaschinen 39, 77, 79
 Gleichstromsteller 103
 Gliederung elektrischer Maschinen 16
 Görges'sches Phänomen 293
 Grundswingungsgehalt 13
 Gruppenfaktor 187
 GTO-Thyristoren 104

H

Hangabtriebskraft 460
 hartmagnetische Werkstoffe 29
 Hauptpol 42, 57, 353
 Hauptreaktanz 205
 HF-Litze 179
 Hilfsreihenschlusswicklung 75, 85
 Hochlaufmoment 297
 Hysteresemotor 438
 Hystereseschleife 25, 29
 Hystereseverluste 25

I

IEC-Normen 468
 Induktionsgesetz 26
 innere Leistung 64
 inneres Moment 232
 Isolation 129
 Isolationsschäden 318

K

Käfigläufer 219
 Kapp'sches Dreieck 150
 Kennlinie 79
 Kennzahl 159
 Kernaufbau 127
 kinematische Grundgleichungen 458
 Kippunkte 234

Kleinmaschinen 434
Kleintransformatoren 171
Kloß'sche Gleichung 234
Kohlebürsten 40
Kollektor 40
Kommutator 40
Kommutierung 67, 121
Kommutierungszeit 67
Kompensationswicklung 72, 74
Kompoundierung 363
Kompoundwicklung 75, 85
Kondensatorhilfswicklung 340
Konstantspannungsgenerator 363
Konstruktionsprinzipien 15
kornorientierte Elektrobleche 24
Kräfte 428
Kraftwirkung 27
Kreisdiagramm 238
Kühlarten 483
Kühlsysteme 420
Kühlung 130
Kühlungsarten 137
Kurzschlussspannung 154
Kurzschlussstrom 173
Kurzstator-Linearmotor 325
Kurzstatormotor 325
Kurzzeitbetrieb 484
Kusa-Schaltung 286

L

Ladeinfrastruktur 446
Lademanagementsystem 451
Lamellenspannung 62
Langstator-Linearmotor 325, 426
Langstatormotor 325
Lärmbekämpfung 158
Lastverteilung 165
Läufer 218, 363
Läuferrückspeisung 305
Läuferspannung 220
Läuferstrang, Ausfall 293
Läufervorwiderstände 262
Leerlauf 144
Leerlaufdaten 145
Leerlaufdrehzahl 83
Leerlaufkennlinie 79

Leerlauf-Kurzschluss-Verhältnis 381
Leerlaufversuch 246
Leichtbauweise 457
Leistungsbereich 39, 126, 217
Leistungsbilanz 230
Leistungsdiagramm 391
Leistungsdichte 450, 454
Leistungsfaktor 13
Leistungsmaßstab 245
Leistungsminderung 110
Leistungsschild 12, 486
Leistungsschildangaben 483
Leistungsübertrager 36, 38, 178
Leistungsverhältnis 166
Li-Ion 449
linearer Positionierantrieb 423
Linearmotoren 322
Luftkühlung 418
Luftwiderstand 460

M

magnetische Feldkonstante 20
magnetischer Kreis 20, 30
Magnetisierungsdurchflutung 223
Magnetisierungskennlinie 25
Magnetisierungsstrom 146
Magnetostriktion 158
Magnetschwebebahn 426
Maschinentransformatoren 126
Maschinenumformer 221
Mehrquadrantenbetrieb 98
Messwandler 171
Mitfeld 201
Mitsystem 211
Modellmaschine 412
Motorauswahl 476
Motorbetrieb 250
Muschelkurven 453

N

Nebenschlussverhalten 83
NEFZ-Verfahren 450
Netzbetrieb 385
Netztransformatoren 126
neutrale Zone 60

nicht-sinusförmige Spannungen 178
 Normung 467
 Nullsystem 211
 numerische Feldberechnung 22
 Nutschrägung 257
 Nutstreuung 206
 Nutungsharmonische 191, 258
 Nutzbremmung 94
 Nutzwiderstand 229

O

Oberfelder 204
 Oberschwingungen 105
 Oberwellendrehfelder 252
 Oberwellenstreuung 206
 Ortskurve 238

P

Parallelbetrieb 165
 Parallelhybrid 447
 Park'sche Transformation 409
 Pendelmomente 112, 318
 Pendelungen 406
 Phasenschieberbetrieb 387
 Phasenvervielfacher 170
 Plug-In-Hybrid 446
 Polbedeckungsfaktor 57
 Polteilung 41
 Polumschaltung 267
 Positionierantriebe 424
 Potier-Dreieck 379
 Pulsbetrieb 103

Q

quasistationäre Antriebsaufgabe 463
 Querspannung 71

R

Radnabenmaschine 449
 Raumzeiger 315
 Reaktanzspannung 68
 Reaktionsmoment 399
 Regelung, feldorientierte 315

Reibkraft 459
 Reihenschlussmotor 86, 91
 Rekuperation 446, 453
 relative Kurzschlussleistung 154
 Reluktanzmotor 434
 Reluktanzschrittmotor 442
 Remanenzspannung 79
 Ringmotor 447
 Roebel-Stab 357
 Rundfeuer 63
 Rüttelkräfte 259

S

Sättigungsfaktor 31
 Sättigungsverhalten 38
 Schaltbilder 77, 78
 Schaltgruppen 159
 Schaltgruppen, Auswahl 164
 Schaltungsvarianten 178
 Schaltverschiebung 122
 Schaltzeichen 159
 Scheibenläufermotor 54
 Scheibenwicklung 129
 Schenkelpolgenerator 359
 Schenkelpolmaschine 357, 393
 Schergerade 32
 Schiefast 408
 Schleifenwicklung 47, 49
 Schleifringläufer 218
 Schleifringläufermotor 330
 Schlupferhöhung 262
 Schlupfgerade 243
 Schrägschnitt 127
 Schrittarten 442
 Schrittmotor 440
 Schubkraft 323
 Schubkräfte 323, 424
 Schutzarten 12, 471
 Sechspuls-Brückenschaltung 99
 Sehnenwicklung 46
 Sehnungsfaktor 188
 selbsterregte Asynchrongeneratoren 326
 selbsterregte, komprimierte Synchron-
 generatoren 363
 Selbsterregung 80
 Selbstinduktionsspannung 26

Selbstkühlung 483
Seltene Erden 30
SE-Magnete 34
Semi-processed-Bleche 24
Seriell-Hybridkonzept 447, 449
Sicherheits- und Komfortfunktionen 458
Skin- und Proximity-Effekt 179
Sondertransformatoren 169
Spaltpol 353
Spaltpolmotoren 353
Spannungsabsenkung 266
Spannungsänderung 151
Spannungsformel 144
Spannungsgleichung 139, 227
Spannungshaltung 327
Spannungspulsdauer 179
Spannungswandler 172
Spartransformator 172
Speicherkapazität 450
Spulenweite 46
Ständer 42, 218
Ständerlängsdurchflutung 393
Ständerquerdurchflutung 393
Ständerstrom 414
stationärer Fahrbetrieb 459
Stator-Mantelkühlung 452
Steinmetzformel 37
Steinmetz-Schaltung 349
Stelltransformator 176
Stern-Dreieck-Anlauf 285, 299
Stern-Dreieck-Schaltung 284
Sternpunktverlagerung 163
Steuerkennlinie 272
Stirnstreuung 206
Stoßkurzschluss 156, 413
Stoßkurzschlussstrom 415
Strangfeld 196
Streureaktanzen 142, 206
Streuziffer 30, 233
Strombelag 195
Stromdiagramm 371
Stromgleichung 394
Strommaßstab 245
Stromortskurve 118, 238, 270, 388, 396
Stromrichterbetrieb 97, 105, 401
Stromrichtererrregung 361
Stromrichterkaskade, USK 305

Stromrichtermotor 402
Stromrichterschaltungen 99
Stromverdrängung 319
Stromverdrängungsläufer 320
Stromwandler 171
Stromwelligkeit 106
Stromwender 40, 45
Stromwendespannung 68, 121, 122
Stromwendung 67
Stufenschalter 169
symmetrische Komponenten 210
synchrone Oberfeldmomente 254
Synchronisation 401
synchronisierendes Moment 405
Synchronmaschine 356, 367, 375, 385
Synchronmaschine, Reaktanzen 414
Synchronreaktanz 374

T

Taktfrequenz 105
Tempeltyp 128
Temperatureinfluss 36
Toleranzen 487
Transformationesspannung 26, 121, 123
Transformator 125
Transformatorgeräusche 158
Transistorsteller 104
TRANSRAPID 426
Transversalflussmotor 429
Trapezumrichter 405
Triacsteuerung 121
Trockentransformator 138
Trommelwicklung 45
Turbogeneratoren 358, 418
Typenleistung 173

U

Übersetzungsverhältnisse 228
Umkehrstromrichter 101
Universalmotor 115, 116
unsymmetrische Betriebszustände 290
untersynchrone Stromrichterkaskade 305

V

vereinfachtes Ersatzschaltbild 150
 Verlustaufteilung 244
 Verluste 317, 477
 Verschiebungsfaktor 13
 V-Kurven 389
 Vollpolmaschine 357, 369

W

Wachstumsgesetze 130
 Wandertransformatoren 126
 Wärmeklasse 479, 481
 Wärmequellennetz 479
 Wasserschutz 473
 Wasserstoff-Kühlung 418
 Wechseipol-Bauweise 441
 Wellblechkessel 138
 Wellenwicklung 48, 49
 Wendefeldspannung 71, 121
 Wendepole 42, 72
 Wicklung 129
 Wicklungsarten 47
 Wicklungsfaktor 186, 189
 Wicklungsstrang 193

Widerstandsbremmung 94
 Widerstandshilfswicklung 346
 Widerstandsstufen des Anlassers 281
 Wiedereinschalten 299
 Wirbelstromverluste 26
 Wirkungsgrad 14, 131, 477
 Wirkungsgradkurve 131
 WLTP/WLTC-Verfahren 450

Z

Zahnspulenwicklungen 367
 Zeigerdiagramm 229, 374
 Zickzackschaltung 159
 Zonenfaktor 187
 Zündschutzart 475
 Zusatzisenverluste 257
 Zweiachsendarstellung 408
 Zweiphasenmotor 340
 Zweiphasensystem 214
 Zweipuls-Brückenschaltung 99
 Zweischichtwicklungen 185
 zweisträngige Belastung 161
 zweisträngiger Schrittmotor 442
 Zylinderwicklung 129