

Rolf Fischer
Eugen Nolle



Elektrische Maschinen

Aufbau, Wirkungsweise
und Betriebsverhalten



18., neu bearbeitete Auflage

HANSER



Ihr Plus – digitale Zusatzinhalte!

Auf unserem Download-Portal finden Sie zu diesem Titel kostenloses Zusatzmaterial.

Geben Sie auf plus.hanser-fachbuch.de einfach diesen Code ein:

`plus-pr7vm-f95kb`



Bleiben Sie auf dem Laufenden!

Hanser Newsletter informieren Sie regelmäßig über neue Bücher und Termine aus den verschiedenen Bereichen der Technik. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter

www.hanser-fachbuch.de/newsletter

Rolf Fischer, Eugen Nolle

Elektrische Maschinen

Aufbau, Wirkungsweise und Betriebsverhalten

18., neu bearbeitete Auflage

HANSER

Prof. Dr.-Ing. Rolf Fischer

Prof. Dr.-Ing. Eugen Nolle

Hochschule Esslingen



Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Print-ISBN: 978-3-446-469 12-9

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren), auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – mit Ausnahme der in den §§ 53, 54 URG genannten Sonderfälle –, reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2022 Carl Hanser Verlag München

Internet: <http://www.hanser-fachbuch.de>

Lektorat: Frank Katzenmayer

Satz: Eberl & Koesel Studio GmbH, Altusried-Krugzell

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

Coverrealisation: Max Kostopoulos

Druck und Bindung: CPI books GmbH, Leck

Printed in Germany

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.

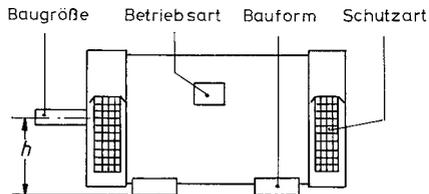


Bild 1.1 Vorgaben im Elektromaschinenbau

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.

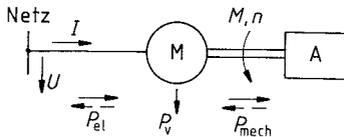


Bild 1.2 Elektrische Maschine M als Energiewandler
A Arbeitsmaschine/Antrieb – Motor – – – Generator

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 %.

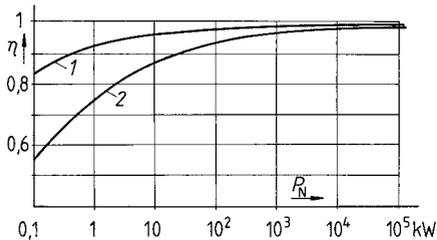


Bild 1.3 Wirkungsgrade rotierender und statischer Energiewandler

- 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.

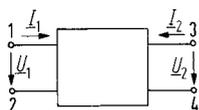


Bild 1.4 Anwendung des Verbraucher-Pfeilsystems auf einen Vierpol (Zweitor)

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.

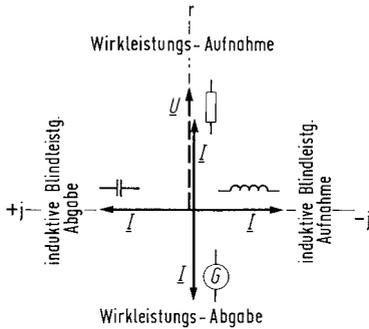


Bild 1.5 Festlegung der Belastungsart im Koordinatensystem für das Verbraucherpeilsystem

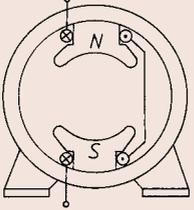
1.1.3 Bauarten und Gliederung elektrischer Maschinen

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

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

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

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

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

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

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

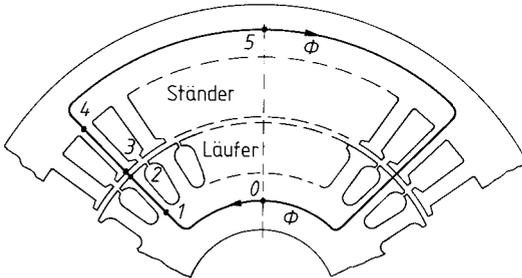


Bild 1.6 Magnetischer Kreis einer Drehstrom-Asynchronmaschine

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

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.

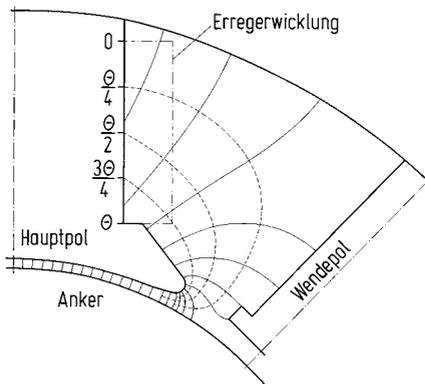


Bild 1.7 Feldbild des Erregerfeldes einer vierpoligen Gleichstrommaschine
– Feldlinien – – – Niveaulinien

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.

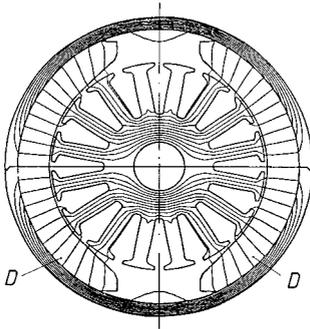


Bild 1.8 Feldbild der Dauermagneten D eines zweipoligen Kleinmotors
Ermittelt mit dem MAGGY-Programm
(Valvo, Philips Bauelemente, Lit. 10)



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

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 Blechsor ten 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 $B = 1,5$ T und $f = 50$ Hz sowie die Blechstärke d angibt. Als Beispiel sei die Sorte M250-50 A mit $v_{15} = 2,5$ W/kg und $d = 0,5$ 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].

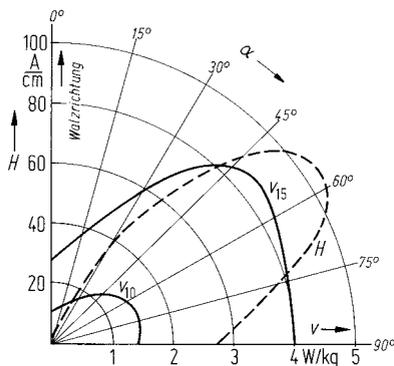


Bild 1.9 Richtungsabhängigkeit der spezifischen Verluste v und der magnetischen Feldstärke H für $B = 1,5$ T bei kornorientierten Elektroblechen α Abweichung von der Walzrichtung

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.

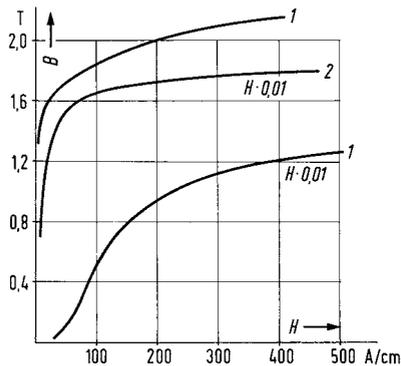


Bild 1.10 Gleichstrom-Magnetisierungskurven
1 Elektroblech 0,5 mm, schlussgeglüht
2 kornorientiertes Blech 0,35 mm

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.

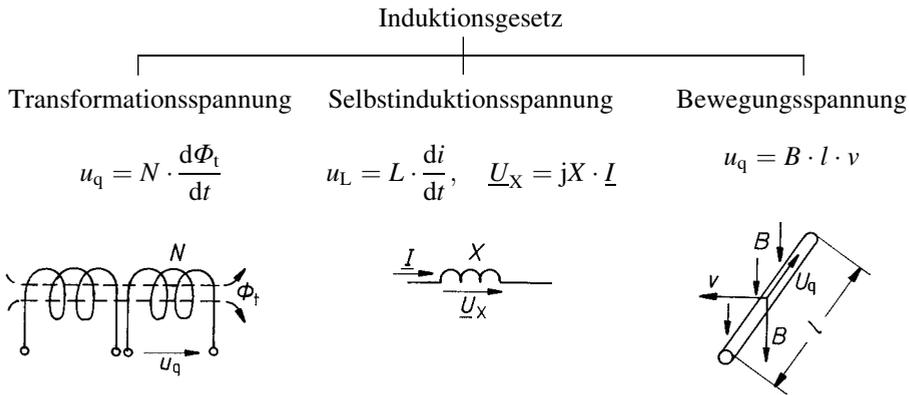
Bei von den Bezugswerten abweichenden Betriebsgrößen B und f errechnet man die gesamten Eisenverluste der Masse m_{Fe} aus

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

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:



Die obigen Beziehungen sind im Übrigen alle in der allgemeinen Form des Induktionsgesetzes als totales Differenzial nach

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\partial\Phi}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial\Phi}{\partial t}$$

mit der Addition von Bewegungs- und Ruheterm enthalten.

Besonders die Gleichung für die Bewegungsspannung

$$\boxed{U_q = B \cdot l \cdot v} \tag{1.18}$$

wird gerne zur Auslegung der Wicklung eines Generators benutzt. In der obigen einfachen Form ist vorausgesetzt, dass die Leiter der Länge l , der Vektor der Flussdichte B und die Richtung der Bewegung alle senkrecht aufeinander stehen. Dies ist durch die Konstruktion des Generators sichergestellt.

Kraftwirkung. Für die Wirkungsweise elektrischer Maschinen ist neben dem Induktionsgesetz vor allem die Kraftwirkung auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld von Bedeutung. Nach Bild 1.11 erfährt ein Stab der Länge l auf einem Läufer, der den Strom I führt, die Tangentialkraft F mit der Verknüpfung

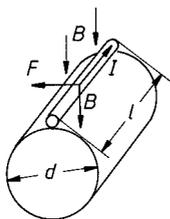


Bild 1.11 Tangentialkraft F auf einen stromdurchflossenen Leiter im Magnetfeld

$$\boxed{\vec{F} = I \cdot (\vec{l} \times \vec{B})} \tag{1.19 a}$$

Der Vektor \vec{l} ist dabei in die Stromrichtung gelegt.

Bilden Feldrichtung und Leiter einen rechten Winkel, so vereinfacht sich Gl. (1.19 a) zu

$$\boxed{F = B \cdot l \cdot I} \quad (1.19 \text{ b})$$

Gl. (1.19 b) ist die Grundlage für die Berechnung des Drehmomentes elektrischer Maschinen. Es ergibt sich nach

$$\boxed{M = \frac{d}{2} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} F_i} \quad (1.20)$$

aus der Summe aller Tangentialkräfte multipliziert mit dem Läuferadius $d/2$ als Hebelarm. Wie nachstehend gezeigt, gilt dies, obwohl die Strom führenden Leiter in Nuten und damit in einem fast feldfreien Bereich liegen.

Feldkräfte. In Bild 1.12 stehen sich zwei Eisenflächen gegenüber, zwischen denen die Flussdichte B herrscht. Über eine Energiebetrachtung lässt sich berechnen, dass auf die Austrittsfläche A der Feldlinien eine Anziehungskraft nach

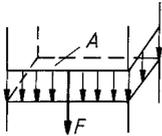


Bild 1.12 Feldkräfte F zwischen gegenüberliegenden Eisenflächen

$$\boxed{F = \frac{B^2 \cdot A}{2\mu_0}} \quad (1.21)$$

auftritt. Auf derartigen Feldkräften beruht auch das in elektrischen Maschinen nach Gl. (1.20) entstehende Drehmoment. Die hierfür wirksamen Tangentialkräfte greifen im Wesentlichen nicht am Leiter an, sondern nach [1, 2] an den Zähnen.

Die wirksamen Tangentialkräfte F_i elektrischer Maschinen entstehen hauptsächlich durch Maxwell'sche Zugspannungen an den Zahnflanken. Bei stromloser Nut und symmetrischem Feldverlauf heben sich die gleich großen nach innen gerichteten Feldkräfte auf (Bild 1.13). Durch das Eigenfeld des Nutstromes ergeben sich dann ungleiche Flussdichten in den Zähnen mit entsprechend unterschiedlichen Werten F_1 und F_2 . Auf den Umfang bezogen erhält man zusammen mit dem kleinen Anteil F_s auf den Leiter genau die Tangentialkraft $F_i = B_L \cdot l \cdot I$. Das Drehmoment kann damit nach Gl. (1.20) aus der Flussdichte B_L im Luftspalt bei Leerlauf und einem aus den Nutströmen errechneten Strombelag am Umfang bestimmt werden.

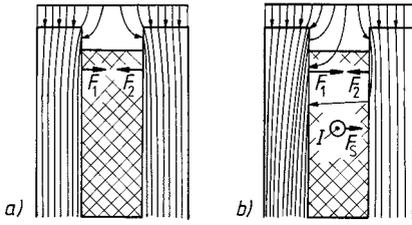


Bild 1.13 Magnetische Feldkräfte an den Zahnflanken einer Nut

- a) Nut stromlos, $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0$
- b) Nut mit Strom $I, \vec{F}_1 + \vec{F}_2 > 0$

1.2.4 Der magnetische Kreis mit Dauermagneten

Hartmagnetische Werkstoffe. Im magnetischen Kreis von Maschinen mit elektrischer Felderregung werden zur Minimierung der erforderlichen Durchflutung und der Umagnetisierungsverluste stets so genannte weichmagnetische Eisensorten mit möglichst hoher Sättigungsinduktion und schmaler Hystereseschleife verwendet. Im Unterschied zu diesen zuvor besprochenen Elektroblechen benötigt man für die Herstellung von Dauer- oder Permanentmagneten Materialien, die eine möglichst hohe Koerzitivfeldstärke H_c besitzen (Bild 1.14). Im Bereich elektrischer Maschinen werden Dauermagnete zur Erregung von Gleichstrom-Kleinmotoren z. B. für die Kfz-Elektrik sowie für Schritt- und Servomotoren verwendet [8 - 12, 113 - 118].

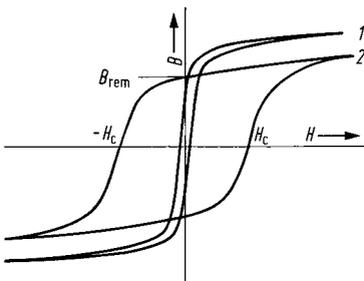


Bild 1.14 Hystereseschleife
1 weichmagnetisches Material
2 hartmagnetisches Material

Kennzeichnend für ein Dauermagnetmaterial ist seine Entmagnetisierungskurve im 2. Quadranten des $B = f(H)$ -Kennlinienfeldes (Bild 1.15) und daraus das maximale Produkt $(B \cdot H)_{\max}$, das in der Einheit kJ/m^3 die Energiedichte bestimmt. Als Materialien stehen heute zur Verfügung:

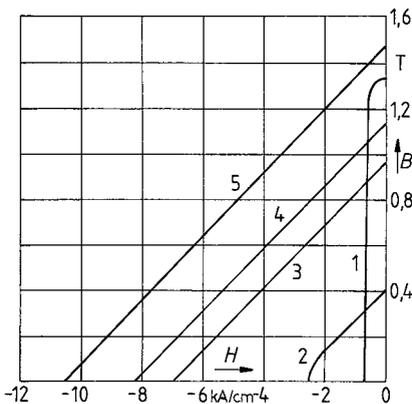


Bild 1.15 Kennlinien von Dauermagnetwerkstoffen (Vacuumschmelze Hanau)

- 1 AlNiCo
- 2 Hartferrit
- 3 Selten-Erde SmCo_5
- 4 Selten-Erde $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$
- 5 Selten-Erde NdFeB

1. Legierungen der Metalle Al, Co, Ni, Ti, aus denen meist in einem Gussverfahren die gewünschte Magnetform hergestellt wird. Diese AlNiCo-Magnete genannten Legierungen erreichen mit $B_{\text{rem}} \leq 1,3 \text{ T}$ zwar hohe Remanenzwerte, besitzen aber nur die geringe Koerzitivfeldstärke von Kurve 1 in Bild 1.15.

AlNiCo-Magnete sind damit sehr anfällig gegen eine Entmagnetisierung durch Fremdfelder oder eine Luftspaltvergrößerung, z. B. durch den Ausbau des Läufers. In elektrischen Maschinen werden sie nur selten eingesetzt.

2. Keramische Werkstoffe, die durch Pressen und Sintern von Erdalkalioxiden und Eisenoxiden gewonnen und als Ferrite bezeichnet werden. Diese Magnete lassen sich mit $H_c \leq 2,5 \text{ kA/cm}$ (Kurve 2) wesentlich schlechter entmagnetisieren, erreichen aber nur $B_{\text{rem}} \leq 0,4 \text{ T}$. Ferrite stellen auf Grund ihres günstigen Preises heute noch den Hauptteil der in der Praxis vielfältig eingesetzten Dauermagnete. Als Beispiele seien alle Kfz-Hilfsantriebe und die Haltemagnete an Möbeln usw. genannt.
3. Legierungen aus Verbindungen der Seltenen Erden haben zur jüngsten Gruppe von Dauermagnetwerkstoffen geführt, die entsprechend den Geraden 3 bis 5 in Bild 1.15 sowohl eine hohe Remanenz wie große Koerzitivfeldstärke besitzen. Sie werden etwa wie die Ferrite hergestellt und erreichen Energiedichten bis ca. 450 kJ/m^3 . Dauermagnete aus Seltenen Erden werden vor allem zur Erregung von Gleichstrom- und Synchronservomotoren eingesetzt.

Magnetischer Kreis. Die grundsätzliche Berechnung eines magnetischen Kreises mit einem Dauermagneten soll über die Anordnung in Bild 1.16 gezeigt werden. Sie enthält mit dem Magneten, einem Weicheisenteil mit Luftspalt und einer Spule (mit deren Strom I eine Auf- oder Gegenmagnetisierung möglich ist) alle in der Praxis vorhandenen Komponenten.

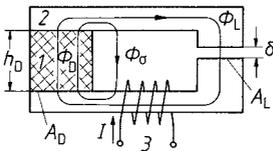


Bild 1.16 Magnetischer Kreis mit Dauermagnet

- 1 Dauermagnet
- 2 Weicheisen
- 3 Spule zur Aufmagnetisierung

Der Fluss Φ_D des Dauermagneten teilt sich in den Hauptanteil Φ_L über den Luftspalt δ und einen kleinen Streufluss Φ_σ . Mit der Streuziffer $\sigma = \Phi_\sigma / \Phi_L$ erhält man die Flussgleichungen

$$\Phi_D = \Phi_L \cdot (1 + \sigma)$$

$$\text{bzw.} \quad \boxed{B_D \cdot A_D = B_L \cdot A_L \cdot (1 + \sigma)} \quad (1.22)$$

Durch den Spulenstrom I erhält der magnetische Kreis die Durchflutung Θ , welche die magnetische Teilspannung für Magnet, Luftspalt und Eisenweg aufbringt. Es gilt damit die Durchflutungsgleichung

$$\boxed{\Theta = V_D + V_L + V_{Fe}} \quad (1.23)$$

$$\boxed{\text{mit } V_D = H_D \cdot h_D \quad \text{und} \quad V_L = H_L \cdot \delta}$$

Der Durchflutungsanteil V_{Fe} für den Weicheisenweg kann über den so genannten Sättigungsfaktor des Kreises

$$k_s = 1 + \frac{V_{Fe}}{V_L}$$

$$\text{und } V_L + V_{Fe} = V_L \cdot k_s = H_L \cdot k_s \cdot \delta$$

als Vergrößerung des Luftspaltes um den Faktor $k_s > 1$ erfasst werden.

Setzt man vorstehende Beziehungen in die Gl. (1.23) ein und teilt durch die Magnethöhe h_D , so erhält man die Feldstärke im Magneten zu

$$\boxed{H_D = \frac{\Theta}{h_D} - H_L \cdot \frac{\delta}{h_D} \cdot k_s} \quad (1.24)$$

Kombiniert man diese Gleichung mit Gl. (1.22), so ergibt sich wegen $B_L = \mu_0 \cdot H_L$

$$H_D = \frac{\Theta}{h_D} - \frac{B_D}{\mu_0} \cdot \frac{A_D}{A_L} \cdot \frac{\delta}{h_D} \cdot \frac{k_s}{1 + \sigma}$$

In dieser Gleichung ist das Produkt hinter der Größe B_D als Verhältnis von Längen und Flächen eine reine Zahl, die mit

$$\boxed{N_D = \frac{A_D}{A_L} \cdot \frac{\delta}{h_D} \cdot \frac{k_s}{1 + \sigma}} \quad (1.25)$$

als Entmagnetisierungsfaktor bezeichnet wird. Er kann aus den geometrischen Abmessungen des magnetischen Kreises, dem gewählten Sättigungsfaktor k_s und der Streuziffer $\sigma = 0,02$ bis $0,1$ berechnet werden.

Mit der Definition des Entmagnetisierungsfaktors erhält man für die magnetische Feldstärke im Dauermagneten die Beziehung

$$\boxed{H_D = \frac{\Theta}{h_D} - \frac{B_D}{\mu_0} \cdot N_D} \quad (1.26 \text{ a})$$

Sie beschreibt im B - H -Diagramm die Gleichung der so genannten Schergeraden g_D und ist neben der Entmagnetisierungskurve des Werkstoffes ein weiterer geometrischer Ort für

die Lage des Arbeitspunktes P des Dauermagnetkreises. Dieser liegt also stets im Schnittpunkt von Schergeraden und Magnetkennlinie.

Wirkt mit $\Theta = 0$ keine äußere Durchflutung, so vereinfacht sich Gl. (1.26 a) zu der Ursprungsgeraden

$$\boxed{H_D = -\frac{B_D}{\mu_0} \cdot N_D} \quad (1.26 \text{ b})$$

in Bild 1.17. Im Magnetkreis mit Luftspalt bleibt die Remanenz B_{rem} also nicht erhalten, sondern der Magnet verringert seine Flussdichte und erreicht dadurch negative H_D -Werte, mit denen er die Bedingung $H_D \cdot h_D + H_L \cdot k_s \cdot \delta = 0$ realisiert. Wie stark diese Teilentmagnetisierung im Vergleich zum Remanenzwert auftritt, hängt von der Größe des Entmagnetisierungsfaktors N_D ab. Dieser bestimmt mit $\tan \alpha_D = 0H_D / 0B_D$ die Steigung der Schergeraden g_D .

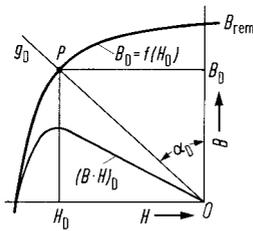


Bild 1.17 Teilentmagnetisierung eines Dauermagnetkreises durch einen Luftspalt, g_D Schergerade

Lage des Arbeitspunktes. Die Lage des Arbeitspunktes P auf der Magnetkennlinie lässt sich so wählen, dass für eine im Luftspalt gewünschte Flussdichte B_L das kleinstmögliche Magnetvolumen V_D und damit die geringsten Kosten für das Dauermagnetmaterial entstehen. Multipliziert man nämlich beide Seiten der aus den Gl. (1.22) und (1.24) gegebenen Zuordnungen

$$H_D \cdot h_D = H_L \cdot k_s \cdot \delta$$

$$B_D \cdot A_D = B_L \cdot A_L \cdot (1 + \sigma)$$

miteinander, so erhält man mit den Luftspaltvolumen $V_L = A_L \cdot \delta$ für das Magnetvolumen $V_D = A_D \cdot h_D$ die Beziehung

$$\boxed{V_D = V_L \cdot \frac{B_L^2}{(B \cdot H)_D} \cdot k_s \cdot \frac{1 + \sigma}{\mu_0}} \quad (1.27)$$

Um den geringsten Werkstoffaufwand $V_{D\text{min}}$ zu realisieren, sollte der Arbeitspunkt P des Magneten nach Gl. (1.27) im Bereich des $(B \cdot H)_{\text{max}}$ -Wertes der Entmagnetisierungskennlinie liegen (Bild 1.17). Bei einem linearen Verlauf wäre dies ein Arbeitspunkt genau in

der Mitte der Kennlinie, d.h. bei $B_D = 0,5 \cdot B_{\text{rem}}$. Wegen der Gefahr einer betrieblichen Entmagnetisierung durch die maximalen Lastströme ist diese Auslegung meist nicht möglich. In der Regel muss die Magnetdicke h_D größer gewählt werden, womit die Schergerade steiler wird und der Arbeitspunkt weiter oben liegt.

Gleichung des Arbeitspunktes. Ist die Entmagnetisierungskennlinie wie bei SE-Magneten praktisch geradlinig – ansonsten wird die Tangente an dem oberen linearen Teil verwendet –, so entsteht mit den Achsenabschnitten B_{rem} und H_c die Geradengleichung

$$B_D = B_{\text{rem}} + \mu_p \cdot \mu_0 \cdot H_D$$

Ihre Steigung kann mit

$$\mu_p \cdot \mu_0 = B_{\text{rem}} / H_c$$

aus den Werten der Remanenz B_{rem} und dem Betrag der Koerzitivfeldstärke H_c bestimmt werden. Der Anteil μ_p wird darin als permanente Permeabilität bezeichnet.

Kombiniert man obige Geradengleichung mit der Schergeraden nach Gl. (1.26 b), so erhält man mit der Beziehung

$$\boxed{B_D = \frac{B_{\text{rem}}}{1 + \alpha_p \cdot N_D}} \quad (1.28)$$

ein rein rechnerisches Ergebnis für die Lage des Arbeitspunktes mit der Flussdichte B_D im Magneten. Über Gl. (1.22) ist dann mit den geometrischen Daten des magnetischen Kreises der Polfluss Φ_L der Maschine bekannt.

Betriebsbedingte Entmagnetisierung. Im Betrieb des Motors kann es durch

- Luftspaltänderungen, z. B. durch Ausbau des Läufers
- Gegendurchflutungen infolge des Belastungsstromes
- Temperaturänderungen

zu einer weiteren Entmagnetisierung des Dauermagneten kommen. Diese ist immer dann irreversibel und führt zu einer bleibenden Schwächung, wenn zwischenzeitlich der gekrümmte Bereich der Kennlinie $B_D = f(H_D)$ erreicht oder gar die Koerzitivfeldstärke H_c überschritten wird.

In Bild 1.18 ist zunächst angenommen, dass sich mit dem Luftspalt δ_1 der Arbeitspunkt P_1 einstellt. Danach wird z. B. durch den Ausbau des Läufers eines Motors der Luftspalt wesentlich auf $\delta_2 \gg \delta_1$ vergrößert. Dies führt zu dem neuen Arbeitspunkt P_2 im gekrümmten Kennlinienbereich. Nach Wiedereinbau des Läufers und damit wieder δ_1 kehrt der Magnet aber nicht mehr auf der ursprünglichen Kennlinie nach P_1 zurück, sondern er erreicht entlang einer neuen tiefer liegenden $B_D = f(H_D)$ -Kurve den neuen Arbeitspunkt Punkt P_1^* . Der Magnet ist damit bleibend teilentmagnetisiert und besitzt nur noch die Remanenzflussdichte B_{rem}^* .

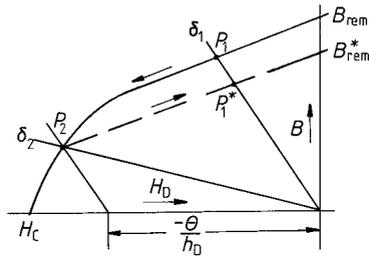


Bild 1.18 Verlagerung des Arbeitspunktes durch Luftspalterweiterung und Gegenfeldstärke Θ/h_D

In dem Mustermagnetkreis in Bild 1.16 ist eine Spule 3 eingetragen, die über ihren Strom I eine Durchflutung $\Theta = I \cdot N$ zur Aufmagnetisierung bereitstellt. Die Größe Θ ist in Gl. (1.26 a) enthalten und ergibt im Vergleich zur Schergeraden aus Gl. (1.26 b) eine Parallelverschiebung um die Feldstärke Θ/h_D . Ist infolge der Wirkung des Belastungsstromes der Maschine eine Gegendurchflutung $-\Theta$ wirksam, so erfolgt die Verschiebung nach links z. B. bis in den Punkt P_2 . Im Leerlauf der Maschine mit $I = 0$ verschwindet diese Gegendurchflutung wieder, wonach sich der Arbeitspunkt wie zuvor auf der unteren Kennlinie mit P_1^* einstellt. Durch die übermäßige Belastung ist also wieder eine bleibende Teilentmagnetisierung entstanden.

In Bild 1.19 ist am Beispiel eines kleinen zweipoligen Dauermagnet-Gleichstrommotors die Entstehung der betriebsbedingten Gegendurchflutung für das Magnetmaterial gezeigt. Sie wird durch die stromdurchflossene Ankerwicklung erzeugt und bewirkt das so genannte Ankerquerfeld Φ_A . Nimmt man für den Magneten mit einem Nordpol N austretende Feldlinien an, so kommt es an der Polkante F zu der beschriebenen Feldschwächung, wie die Gegenläufigkeit der Feldlinien zeigt. Die gleichgerichtete Überlagerung an der anderen Polkante bringt wegen der Sättigung fast keinen Gewinn. Insgesamt entspricht das Geschehen der später bei der Gleichstrommaschine behandelten Ankerrückwirkung.

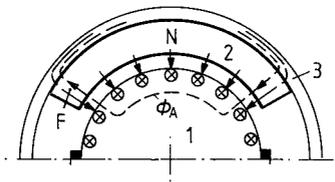


Bild 1.19 Entmagnetisierungsfeldstärke Θ/h_D an der Polkante F durch das Ankerquerfeld Φ_A
 1 Anker mit stromdurchflossener Wicklung
 2 Dauermagnet
 3 Ständerjoch

Erwärmung. Mit höherer Temperatur verringern sich bei den heute für Servoantriebe wichtigen SE-Magneten sowohl die Remanenzflussdichte B_{rem} als auch die Koerzitivfeldstärke H_C . Für den Entwurf des Dauermagnetkreises sind daher die Kennlinien für die betriebswarme Maschine zu verwenden. Da sich vor allem der H_C -Wert teils wesentlich verschlechtert, ist darauf zu achten, dass die Gegenfeldstärke Θ/h_D beim maximalen Laststrom nicht größer als $(H_C)_{warm}$ wird.



Beispiel 1.4: Ein kleiner zweipoliger 12-V-Gleichstrommotor soll eine Dauermagneterregung mit radial magnetisierten Ferritsegmenten erhalten. Das Material hat nach Kurve 2 in Bild 1.15 die Kennwerte $B_{\text{rem}} = 0,4\text{ T}$ und $\mu_p = 1,1$. Mit den Entwurfsdaten (Bild 1.20) $d_A = 40\text{ mm}$, $\delta = 0,7\text{ mm}$, $\gamma = 140^\circ$, $\sigma = 0,1$, $k_s = 1,3$, $h_D = 4\text{ mm}$, Anker- und Pollänge $l = 35\text{ mm}$ sind die Werte für B_D und Φ_L anzugeben.

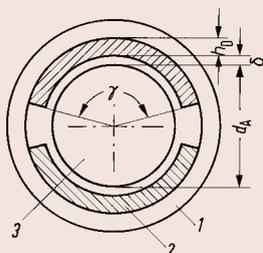


Bild 1.20 Aufbau eines Gleichstrom-Kleinmotors mit Dauermagneterregung
1 Jochring aus Weicheisen
2 Ferrit-Schalenmagnet
3 Anker

- a) Im oberen geradlinigen Teil der Entmagnetisierungskennlinie der Ferrite lässt sich die Flussdichte B_D im Arbeitspunkt direkt über Gl. (1.28) zu

$$B_D = \frac{B_r}{1 + \mu_p \cdot N_D}$$

berechnen. Für den Entmagnetisierungsfaktor erhält man bei $A_D \approx A_L$

$$N_D = \frac{A_D}{A_L} \cdot \frac{\delta}{h_D} \cdot \frac{k_s}{1 + \sigma} = 1 \cdot \frac{0,7}{4} \cdot \frac{1,3}{1,1} = 0,207$$

und damit

$$B_D = \frac{0,4\text{ T}}{1 + 1,1 \cdot 0,207} = 0,326\text{ T}$$

Nach Gl. (1.22) gilt für den Luftspaltfluss $\Phi_L = \frac{B_D \cdot A_D}{1 + \sigma}$
und die Fläche entsprechend dem Polbogen

$$A_L \approx A_D = d_A \cdot \pi \cdot l \cdot \gamma / 360^\circ = 40\text{ mm} \cdot \pi \cdot 35\text{ mm} \cdot 140^\circ / 360^\circ = 17,1 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2$$

Damit wird

$$\Phi_L = \frac{0,326\text{ V} \cdot \text{s} \cdot 17,1 \cdot 10^{-4}\text{ m}^2}{\text{m}^2 \cdot 1,1} = 0,507\text{ mV} \cdot \text{s}$$

- b) Die 16 Nuten des Ankers nach Bild 1.8 führen den Strom $I_Q = 5$ A. Wie groß ist etwa das mögliche Drehmoment M , wenn pro Pol 6 Zähne eine Tangentialkraft nach Gl. (1.19 b) erzeugen?

$$\text{Tangentialkraft pro Zahn } F_Q = B_L \cdot l \cdot I_Q = 0,326 \text{ T} \cdot 0,035 \text{ m} \cdot 5 \text{ A} = 0,057 \text{ N}$$

$$\text{Drehmoment nach Gl. (1.20) } M = 0,5 \cdot d \cdot \sum F_Q = 0,5 \cdot 0,04 \text{ m} \cdot (2 \cdot 6) \cdot 0,057 \text{ N} = 0,014 \text{ Nm}$$

- c) Es ist Radialkraft F_R zwischen Zahn und Dauermagnet zu bestimmen

$$\text{Zahnfläche } A = \frac{3}{4} l \cdot d \cdot \pi / 16 = \frac{3}{4} 3,5 \text{ cm} \cdot 4 \text{ cm} \cdot \pi / 16 = 2,06 \text{ cm}^2$$

$$\text{Radialkraft nach Gl. (1.21) } F_R = (0,326 \text{ T})^2 2,06 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 / (2 \cdot 0,4 \pi \cdot 10^{-6} \text{ Vs/Am}) = 8,7 \text{ N}$$

1.2.5 Weichmagnetische Ferrite

Eugen Nolle

Durch die Fortschritte in der Elektronik mit der Möglichkeit der verlustarmen Frequenzwandlung lässt sich im Bereich der Massen-, Konsum- und Endanwendungen der, aus Funktions- und Sicherheitsgründen bisher oft notwendige, vergleichsweise große und schwere Netztransformator zunehmend durch kleinere, leichtere und verlustärmere Leistungsübertrager ersetzen.

Dies erfordert jedoch Kernwerkstoffe, die im Bereich von einigen 10 kHz bis in den MHz-Bereich, bei brauchbaren Flussdichten, noch akzeptable Ummagnetisierungsverluste aufweisen. Geblechte Magnetkreise aus üblichen Elektroblechen scheiden dabei wegen ihren zu großen Wirbelstromverlusten aus. Die diesbezüglich zunächst besonders geeignet erscheinenden Kerne aus den sehr dünnen, amorphen Blechen sind leider nur als Ringkerne verfügbar. Auch sind sie sowohl von den Material- als auch von den Fertigungskosten her teuer und erfordern überdies eine sehr aufwändige und kostenintensive Wickeltechnik. Sie bleiben daher bevorzugt nur Sonderanwendungen vorbehalten und kommen bei Massenanwendungen aus Kostengründen eher nicht zum Einsatz. Vielmehr bieten sich dazu Ferritkerne aus meist MnZnFe-Oxiden, mit ihrem hohen Volumenwiderstand bei allerdings reduzierter Sättigungsinduktion, als Alternativwerkstoff an. Diese sind zwischenzeitlich in großer Auswahl für die unterschiedlichsten Anforderungen verfügbar [1.1].

Für die später in Kapitel 3 konkret betrachteten Leistungsübertrager haben sich dafür 2 Werkstoffgruppen bewährt, die einerseits bevorzugt im Low-Cost-Bereich und andererseits bei höherwertigen, verlustärmeren Ausführungen zum Einsatz kommen. Dabei gelten für beide Produktgruppen gleichermaßen die in Bild 1.21, links beispielhaft dargestellten Magnetisierungskennlinien für 25 °C bzw. 100 °C. Auffällig ist der deutliche Temperatureinfluss auf die Kennlinien, der ähnlich markant auch für die anderen Materialeigenschaften gilt. Dieser stark sortenabhängige Temperatureinfluss muss daher für genauere Untersuchungen stets den konkreten Herstellerangaben entnommen werden. Insbesondere dadurch unterscheiden sich Ferrite auch deutlich von den metallischen Elektroblechen, bei denen der Temperatureinfluss auf die magnetischen Eigenschaften oft näherungsweise vernachlässigt werden kann.

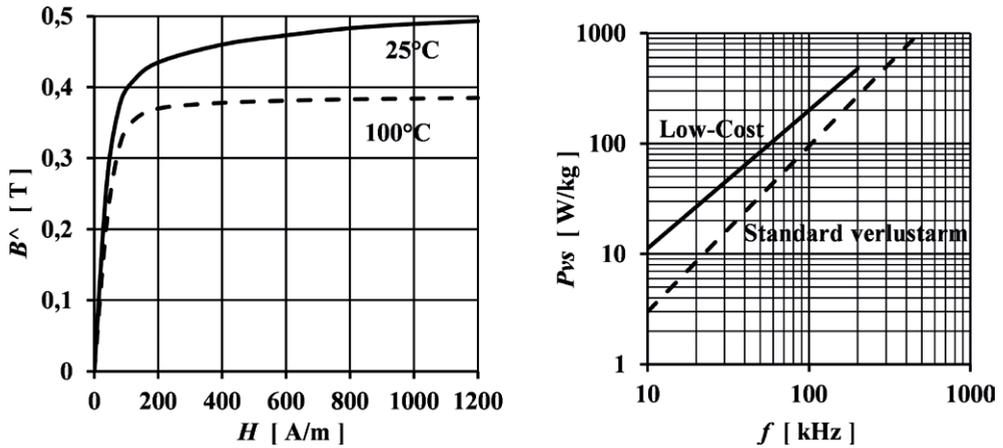


Bild 1.21 Typische Eigenschaften von Ferritkernen. Links: Magnetisierungskennlinien $B(H)$ bei 25°C bzw. 100°C, rechts: spezifische Kernverluste $P_{vs}(f)$ für 0,2 T; 100°C; Sinus

Die Unterschiede der beiden angesprochenen Ferritgruppen betreffen hauptsächlich die in Bild 1.21, rechts für einen zeitlich sinusförmigen Feldverlauf mit dem Scheitelwert 200 mT bei der Kerntemperatur 100°C dargestellten, spezifischen Ummagnetisierungsverluste P_{vs} . Wie bei den Elektroblechen lassen sich diese auch bei Ferriten für allg. Trendaussagen wieder in der kompakten Form (Steinmetzformel)

$$P_{vs} = P_{v0} \cdot \left(\frac{\check{B}}{\check{B}_0} \right)^\alpha \cdot \left(\frac{f}{f_0} \right)^\beta \quad (1.29)$$

mit

$$P_{v0} = P_{vs} \left[\check{B}_0; f_0; 100^\circ\text{C}; \text{Sinus} \right]$$

annähern.

Damit lassen sich die Verluste eines Kernes der Masse m aus den kostengünstigen Low-Cost-Ferriten mit den Bezugswerten $\check{B}_{0T} = 0,2T$ und $f_0 = 100\text{kHz}$ in der Form angeben

$$P_v = 200 \frac{\text{W}}{\text{kg}} \cdot \left(\frac{\check{B}}{0,2T} \right)^{2,2} \cdot \left(\frac{f}{100\text{kHz}} \right)^{1,25} \cdot m \quad (1.30)$$

bzw. bei der verlustärmeren Standardqualität als

$$P_v = 95 \frac{\text{W}}{\text{kg}} \cdot \left(\frac{\check{B}}{0,2T} \right)^{2,75} \cdot \left(\frac{f}{100\text{kHz}} \right)^{1,5} \cdot m \quad (1.31)$$

Dabei weisen die Kernverluste dieser Werkstoffgruppen im praktisch oft bevorzugt genutzten Temperaturbereich zwischen 60 °C und 100 °C ein Minimum auf und steigen sowohl zu tieferen wie auch zu höheren Temperaturen u. U. deutlich an.

Demgegenüber spielt das ausgeprägte Sättigungsverhalten der Ferrite bei den Leistungsübertragern i. d. R. keine Rolle, da man aus Verlustgründen die Induktion ohnehin meist kleiner als 0,3 T wählen muss.



Beispiel 1.5: Ein handelsüblicher Ferritkern aus 2 Halbkernen E 47/20/16 [1.2] wiegt insgesamt $m = 106$ g. Bei einer gegebenen Kühlsituation und 100 °C Kern-temperatur darf er maximal $P_v = 2,4$ W Verluste aufweisen.

Mit welchem maximalen Flussdichtescheitelwert \check{B} darf ein damit gefertigter Leistungsübertrager bei sinusförmigem Feldverlauf ausgelegt werden und zwar

- mit dem Low-Cost-Material bei $f = 25$ kHz und
- bei Verwendung des verlustärmeren Standardmaterials mit $f = 100$ kHz?
- Wie verhalten sich dabei die übertragbaren Leistungen bei identischen Wicklungen?

Mit den vorgegebenen Kernverlusten lassen sich die Gleichungen (1.30) und (1.31) nach \check{B} auflösen und man erhält so für die jeweils zulässige Flussdichte

a)

$$\check{B} = \check{B}_0 \cdot \left[\frac{P_v}{m \cdot P_{v0} \cdot (f / f_0)^\beta} \right]^{\frac{1}{\alpha}} = 0,2\text{T} \cdot \left[\frac{2,4\text{ W}}{0,106\text{ kg} \cdot 200 \frac{\text{W}}{\text{kg}} \cdot (25\text{ kHz} / 100\text{ kHz})^{1,25}} \right]^{\frac{1}{2,2}} = 0,163\text{T}$$

b)

$$\check{B} = \check{B}_0 \cdot \left[\frac{P_v}{m \cdot P_{v0} \cdot (f / f_0)^\beta} \right]^{\frac{1}{\alpha}} = 0,2\text{T} \cdot \left[\frac{2,4\text{ W}}{0,106\text{ kg} \cdot 95 \frac{\text{W}}{\text{kg}} \cdot (100\text{ kHz} / 100\text{ kHz})^{1,5}} \right]^{\frac{1}{2,75}} = 0,119\text{T}$$

- Bei identischen Kernabmessungen und Wicklungseigenschaften ist die übertragbare Leistung proportional zur Windungsspannung und damit proportional zum Produkt $f \cdot \check{B}$

Somit lässt sich mit dem verlustärmeren Kern etwa die 2,92-fache Leistung übertragen:

$$\frac{(f \cdot \check{B})_{\text{verlustarm}}}{(f \cdot \check{B})_{\text{Low-Cost}}} = \frac{100\text{ kHz} \cdot 0,119\text{T}}{25\text{ kHz} \cdot 0,163\text{T}} = 2,92$$

2

Gleichstrommaschinen

Geschichtliche Entwicklung. Auf Grund der geschichtlichen Entwicklung der Starkstromtechnik, die mit der Energie von galvanischen Elementen ihren Anfang nahm, entstand als erster elektromechanischer Energiewandler die Gleichstrommaschine. Bereits 1832 baute der Franzose H. Pixii den ersten Generator für zweiwelligen Gleichstrom. Die weitere Entwicklung ist u. a. mit den Namen A. Pacinotti, der 1860 einen Motor mit Ringwicklung und vielteiligem Stromwender fertigte, und F. v. Hefner-Alteneck, der 1872 den Trommelanker erfand, verknüpft. Einen wesentlichen Beitrag leistete im Jahre 1866 W. Siemens mit der Entdeckung des dynamoelektrischen Prinzips. Durch die damit gegebene Möglichkeit der Selbsterregung von Generatoren war eine Voraussetzung für den Großmaschinenbau geschaffen.

Mit der Einführung des Drehstroms etwa ab 1890 verlor die Gleichstrommaschine ihre beherrschende Stellung an die Synchrongeneratoren und Induktionsmotoren. Begünstigt durch ihre sehr gute Regelbarkeit mit galvanisch und magnetisch getrennten Kreisen für Ankerwicklung und Erregerwicklung sowie den einfachen Aufbau gesteuerter Gleichrichter mit hoher Regelqualität hat die Gleichstrommaschine bislang einen begrenzten Marktanteil behauptet [152].

Leistungsbereich. Der mögliche Fertigungsbereich reicht von Kleinstmotoren mit Leistungen von unter einem Watt für die Feinwerktechnik bis zu den Großmaschinen. Dauermagneterregte Motoren bis ca. 100 W werden in großer Stückzahl in der Kfz-Elektrik als Scheibenwischer-, Gebläse- und Stellmotoren eingesetzt. Im Bereich der Servoantriebe bis zu Leistungen von einigen kW gibt es auch eine Reihe spezieller Bauformen wie Scheibenläufer- und Glockenankermotoren. Den früher vorherrschenden Einsatz als drehzahl geregelter Industrieantrieb in Werkzeugmaschinen, Förderanlagen, Walzenstraßen und auch als Fahrmotor in Bahnen hat der Gleichstrommotor vollständig an die Drehstrommotoren verloren. In ihrer Hochzeit bis in die 70er Jahre wurden Motoren mit Leistungen von über 10 MW gebaut. Der Gleichstromgenerator hat dagegen seit der Erfindung der gesteuerten Stromrichter keine Bedeutung mehr.

■ 2.1 Aufbau und Bauteile

2.1.1 Prinzipieller Aufbau

Erzeugung eines Drehmoments. Die Grundkonstruktion einer Gleichstrommaschine kann man am Beispiel des Motorbetriebs anschaulich als Anwendung des Kraftwirkungsgesetzes nach $F = B \cdot l \cdot I$ erklären. Man benötigt danach ein Magnetfeld der Flussdichte B im Luftspalt der Feldpole und darin drehbar angeordnet Leiter der Länge l , die einen Strom I führen. Die Stromzufuhr muss dabei so erfolgen, dass stets alle Leiter eines Polbereichs gleichsinnig durchflossen sind. Dieser Gedanke ist in der einfachen Anordnung nach Bild 2.1, das bereits alle wesentlichen Bauteile der Gleichstrommaschine enthält, verwirklicht.

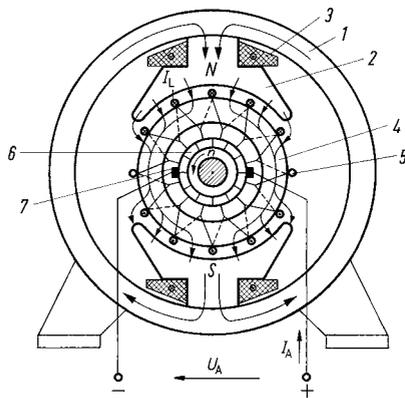


Bild 2.1 Prinzipieller Aufbau einer Gleichstrommaschine

- 1 Jochring
- 2 Hauptpol
- 3 Erregerwicklung
- 4 Ankerblechpaket
- 5 Ankerwicklung
- 6 Stromwender
- 7 Kohlebürsten

Der feststehende Ständer aus massivem oder geblechtem Eisen trägt einen Elektromagneten, dessen Erregerwicklung die zum Aufbau des Feldes erforderliche Durchflutung liefert. Die Enden des Magneten, die Hauptpole, sind nach innen durch so genannte Polschuhe erweitert, um gleichzeitig eine möglichst große Leiterzahl zu erfassen. Den äußeren magnetischen Rückschluss stellt der Jochring sicher.

Die Welle der Maschine trägt einen aus Dynamoblechen geschichteten Eisenkörper, der in Bild 2.1 als Ring dargestellt ist. Der magnetische Kreis ist damit bis auf den erforderlichen Luftspalt ganz aus Eisen mit $\mu_r \gg 1$ aufgebaut. Alle Leiterstäbe bilden zusammen mit ihren Verbindungen die Ankerwicklung, die in Bild 2.1 wie in den Anfängen des Elektromaschinenbaus als Ringwicklung ausgeführt ist. Man bezeichnet den ganzen rotierenden Teil als Anker der Gleichstrommaschine.

Funktion des Stromwenders. Damit die mit I_L (Bild 2.1) stromdurchflossenen Leiter im Ständerfeld fortwährend ein Drehmoment erzeugen können, muss beim Wechsel des Polbereichs während der Drehung eine Umschaltung der Stromrichtung im Ankerleiter erfolgen. Dies erreicht man durch den Stromwender, auch Kommutator oder Kollektor genannt, der aus voneinander isolierten Kupfersegmenten oder Lamellen besteht und fest mit dem Blechpaket auf der Welle sitzt. Die einzelnen Spulen der Ankerwicklung sind mit ihren Anfängen und Enden nacheinander an die Segmente angeschlossen. Die Stromzufuhr in die Ankerwicklung erfolgt dann über Kohlebürsten, die mit dem rotierenden Stromwender

einen Gleitkontakt geben und die Wicklung zwischen den Hauptpolen einspeisen. Wechselt ein Leiter durch diese neutrale Zone, so ändert sich nach Bild 2.1 auch seine Stromrichtung. Der Stromwender erfüllt damit die Funktion eines mechanischen Schalters, und in den Ankerstäben fließt ein zeitlich etwa rechteckiger Wechselstrom.

Erzeugung einer Gleichspannung. Rotiert ein Gleichstromanker im Ständerfeld der Luftspalt-Flussdichte B , so wird in den Leiterstäben entlang des Umfangs nach $U_q = B \cdot l \cdot v$ eine Spannung induziert. Durch die Reihenschaltung der Spulen addieren sich deren Spannungen U_{sp} zwischen benachbarten Kohlebürsten (Bild 2.2) und bilden in ihrer Summe die Quellenspannung der Maschine. Der Stromwender sorgt wieder dafür, dass stets der Maximalwert und damit eine Gleichspannung an den Ankerklemmen auftritt.

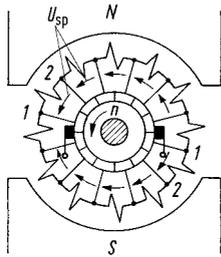


Bild 2.2 Addition der Spulenspannungen U_{sp} durch den Stromwender

Der Aufbau einer Gleichstrommaschine nach Bild 2.1 gestattet also ohne Änderungen den Motor- und den Generatorbetrieb. Die in der Ankerwicklung induzierte Gesamtspannung zwischen den Kohlebürsten hat beim Generator die Funktion einer Quellenspannung, beim Motor wirkt sie als induzierte Spannung der von außen angelegten Gleichspannung entgegen.

Polteilung. Größere Gleichstrommaschinen werden nicht nur mit zwei Hauptpolen, sondern höherpolig ausgeführt (Bild 2.3). Der Bereich eines Poles am Ankerumfang, die Polteilung, sinkt dann auf den Betrag

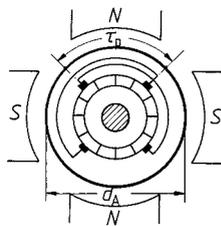


Bild 2.3 Kohlebürsten und Polteilung der vierpoligen Gleichstrommaschine

$$\tau_p = \frac{d_A \cdot \pi}{2p}$$

(2.1)

wobei p die Polpaarzahl bedeutet. Jedes Polpaar erhält je eine Plus- und eine Minusbürste, wobei gleichnamige Bürsten untereinander verbunden sind. Die nach Bild 2.1 erläuterte, grundsätzliche Wirkungsweise der Maschine bleibt vollständig erhalten.



Beispiel 2.1: Wie viel Leiter z_{ges} am Ankerumfang benötigt eine vierpolige Gleichstrommaschine mit Ringwicklung nach Bild 2.1 und einem Ankerdurchmesser $d_A = 34 \text{ cm}$, der Länge $l = 20 \text{ cm}$ bei $n = 1800 \text{ min}^{-1}$ zur Erzeugung der Leerlaufspannung $U_0 = 220 \text{ V}$? Das Erregerfeld besitze einen rechteckförmigen Verlauf der Luftspaltflussdichte von konstant $B_L = 0,86 \text{ T}$ und erfasse gleichmäßig 70% der Polteilung.

Spannung eines Leiters $U_q = B_L \cdot l \cdot \nu$, $\nu = \pi \cdot d_A \cdot n$

$$U_q = 0,86 \cdot 10^{-4} \text{ V} \cdot \text{s/cm}^2 \cdot 20 \text{ cm} \cdot \pi \cdot 34 \text{ cm} \cdot 30 \text{ s}^{-1} = 5,51 \text{ V}$$

Zwischen zwei Bürsten tragen $0,7 \cdot z_{\text{ges}}/2p$ Leiter zur Spannungsbildung bei, damit ist

$$U_0 = \frac{z_{\text{ges}} \cdot 0,7}{2p} \cdot U_q$$

$$\text{und } z_{\text{ges}} = \frac{220 \text{ V} \cdot 4}{0,7 \cdot 5,51 \text{ V}} = 228 \text{ Leiter}$$



Aufgabe 2.1: Obiger Ringanker wird in einen passenden zweipoligen Ständer eingebaut. Die Luftspaltflussdichte beträgt wieder $B_L = 0,86 \text{ T}$ über 70% der neuen Polteilung. Bei welcher Drehzahl wird jetzt die Leerlaufspannung $U_0 = 220 \text{ V}$ erreicht?

Ergebnis: $n = 900 \text{ min}^{-1}$

2.1.2 Bauteile einer Gleichstrommaschine

Die Anforderungen der Stromrichtertechnik, deren Schaltungen heute fast immer die Energieversorgung und Steuerung der Gleichstrommaschine übernehmen, haben deren Konstruktion wesentlich verändert. So wurde aus dem klassischen Aufbau mit einem runden Ständergehäuse aus Massivstahl die vollgeblechte, eckige Ausführung der Schnittzeichnung in Bild 2.4 [13, 14].

Ständer. Zur Aufnahme der magnetischen Gleichfelder der Haupt- und Wendepole genügt prinzipiell ein Massivmaterial, so dass für Maschinen mit geringen regeltechnischen Anforderungen ein Jochring 1 aus Walzstahl gewählt werden kann. Die Hauptpole 2 bestehen immer aus gestanzten Blechen, die mit mehreren Bolzen zu einem festen Paket zusammengedrückt werden. Über dem Polkern liegt die Erregerwicklung 4, während bei Bedarf in Nuten entlang des Polschuhs eine Kompensationswicklung untergebracht ist. Zwischen den Hauptpolen sitzen Wendepole 3, die wie später dargestellt, für einen funkenfreien Betrieb des Stromwenders erforderlich sind. Alle Pole erhalten radiale Gewindelöcher und können so von außen mit Schrauben am Jochinnenmantel befestigt werden.

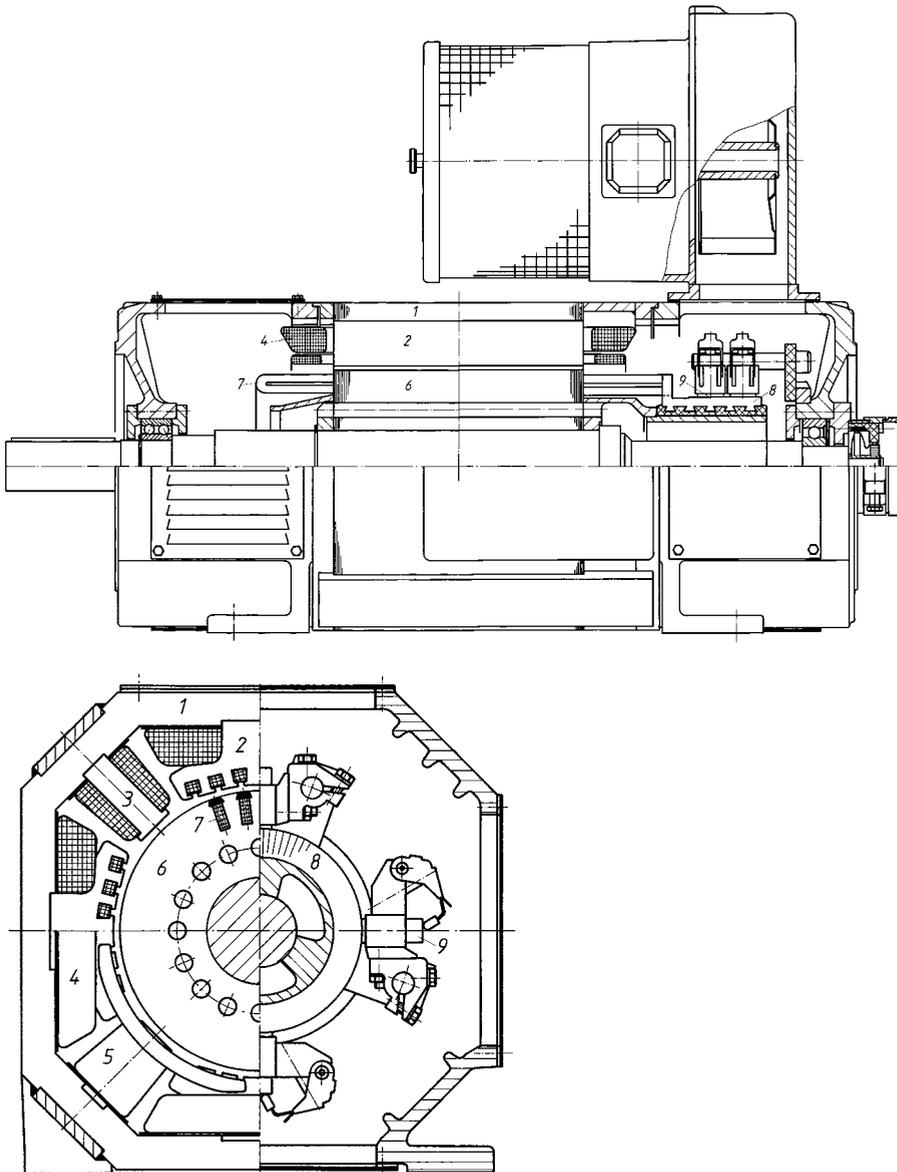


Bild 2.4 Längs- und Querschnitt einer vierpoligen, vollgeblechten Gleichstrommaschine in Viereckbauweise 38 kW, 400 V, 1460 min⁻¹
(Franz Kessler KG, Bad Buchau)

- 1 Ständerblech mit Hauptpolen (2) und Wendepolen (3)
- 4 Erregerwicklung
- 5 Wendepolwicklung
- 6 Anker
- 7 Ankerwicklung
- 8 Stromwender
- 9 Kohlebürsten

Ist z. B. für den Einsatz als Hauptantrieb einer Werkzeugmaschine eine gute Dynamik der Maschine erforderlich, so müssen möglichst rasche Stromänderungen zulässig sein. In diesem Fall ist zur Vermeidung einer Wirbelstromdämpfung der gesamte magnetische Kreis aus isolierten Blechen auszuführen. Nur so lässt sich eine einwandfreie Funktion der Wendepole und eine möglichst kleine Feldumkehrzeit erreichen (s. Abschnitt 2.4.3). Bei den unteren Baugrößen verwendet man gerne einen Komplettschnitt, bei dem wie in Bild 7.4 Jochring, Haupt- und Wendepol aus einem Blech sind. Ansonsten wird der Jochring aus Blechen geschichtet und zu einem Paket verschweißt. Der gesamte Ständer erhält bei diesen vollgeblechten Maschinen heute oft eine rechteckige Form, wie dies auch in den Bildern 2.5 und 2.7 zu sehen ist [151].

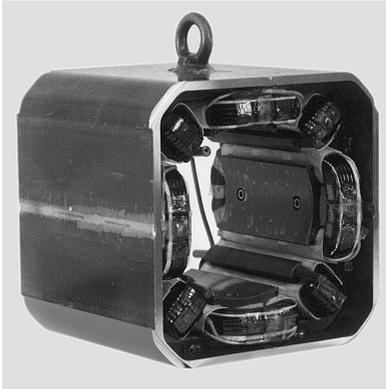


Bild 2.5 Ständer einer vierpoligen Gleichstrommaschine in Viereckbauweise 12 kW, 1500 min^{-1} (Siemens AG, Bad Neustadt)

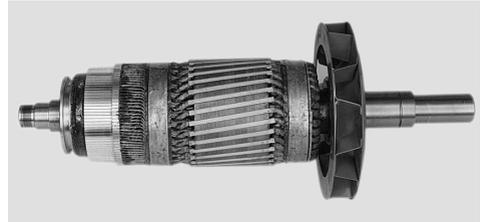


Bild 2.6 Anker zu Ständer in Bild 2.5 (Siemens AG, Bad Neustadt)

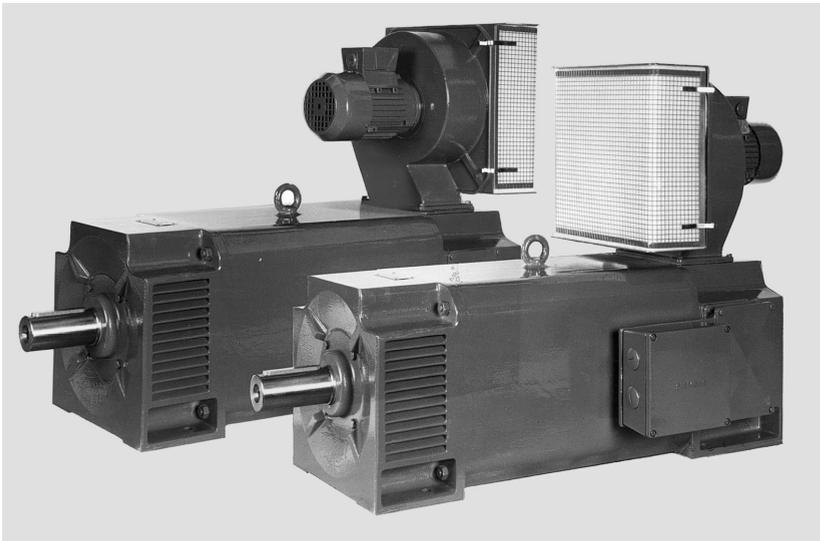


Bild 2.7 Gleichstrommaschinen mit Fremdlüfter für Hauptspindelantriebe (Siemens AG, Bad Neustadt) 40 kW, 1500 min^{-1}

Anker. Das Blechpaket des Ankers (Bild 2.6) besteht aus isolierten Dynamoblechen mit 0,5 mm Stärke, wodurch die Eisenverluste bei der Rotation im Ständerfeld klein gehalten werden. Die Bleche enthalten zur Aufnahme der Ankerwicklung entlang des Umfangs Nuten, die mit einem Keil verschlossen werden. Bei Maschinen kleinerer Leistung verwendet man halbgeschlossene, konische Nuten mit parallelen Zahnflanken und eine Runddrahtwicklung. Für große Leistungen sind parallele Nutflanken mit Schwalbenschwanzkeil und einer Profildrahtwicklung nach Bild 2.10 üblich. Das ganze Blechpaket wird samt seinen Pressringen bei kleineren Maschinen direkt, sonst über Tragarme, auf der Welle befestigt.

Stromwender. Der Stromwender (Kollektor, Kommutator) wird heute überwiegend in einer Pressstoffausführung, wie in Bild 2.4 im Schnitt dargestellt, gefertigt. Die keilförmigen Kupfersegmente, auch Stege oder Lamellen genannt, sind durch eine 0,5 mm bis 1 mm starke Isolierschicht getrennt und in eine Pressmasse eingebettet. Armierungsringe nehmen die Fliehkräfte auf.

Im stromwenderseitigen Lagerschild ist ein verstellbarer Bürstenbrückenring angebracht, der im Abstand einer Polteilung isolierte Bolzen zur Aufnahme der Bürstenhalter trägt. Die darin sitzenden Kohlebürsten werden durch Federdruck auf den Stromwender aufgelegt.

2.1.3 Ankerwicklungen

Trommelwicklung. Die von Pacinotti angegebene Ringwicklung, die wegen ihres einfachen Aufbaus gerne zu prinzipiellen Darstellungen verwendet wird, ist konstruktiv ungünstig, da die Verbindungsleitungen der oberen Leiterstäbe zwischen Ankerblech und Welle hindurchgeführt werden müssen. Zur Spannungsbildung tragen diese Rückleiter ohnehin nichts bei, da der Innenraum praktisch feldfrei ist.

Diesen Nachteil vermeidet die heute verwendete Trommelwicklung dadurch, dass sie die Innenleiter (Index u) unter einen äußeren Stab der nächsten Polteilung (Bild 2.8) legt. Im Rückleiter jeder Spule wird so eine gleiche negative Spannung wie im Hinleiter induziert und somit die Gesamtspannung im Vergleich zur Ringwicklung verdoppelt. Die 1872 von Hefner-Alteneck angegebene Trommelwicklung der Gleichstrommaschine stellt also eine Zweischichtwicklung dar, deren Spulen außerhalb des Ankers fertig hergestellt und in die Nuten eingelegt werden können (Bild 2.9).

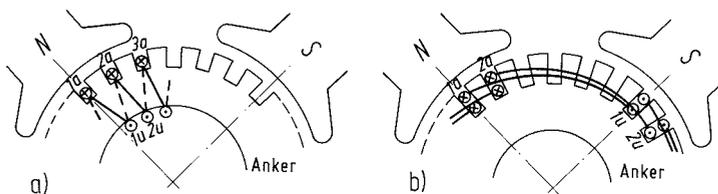


Bild 2.8 Schaltung der Ankerleiter zur Wicklung

- a) Ringwicklung
- b) Trommelwicklung

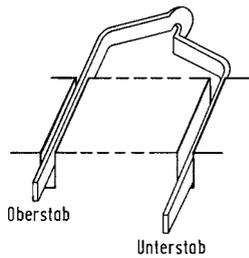


Bild 2.9 Ober- und Unterseite einer Spule mit gekröpfter Stirnverbindung

Da jede Spule mit Anfang und Ende an je eine Stromwenderlamelle angeschlossen ist, stimmt die Anzahl der Spulen mit der Lamellen- oder Stegzahl K überein. Die Nutzahl des Ankers Q wird im Allgemeinen kleiner als die Lamellenzahl gewählt, so dass

$$u = \frac{K}{Q} \quad (2.2)$$

Spulenseiten einer Schicht nebeneinander in einer Nut liegen. Hat eine Spule zudem die Windungszahl N_s , so ergibt sich eine Nutfüllung mit $2u \cdot N_s$ Stäben/Nut. Für eine größere Gleichstrommaschine erhält man dann einen prinzipiellen Aufbau des Nutquerschnitts nach Bild 2.10. Hier liegen die in Reihe geschalteten Stäbe jeder Schicht untereinander und die u Spulenseiten nebeneinander in der Nut. Die Gesamtzahl der Leiterstäbe am Ankerumfang ergibt sich zu $z_A = 2u \cdot N_s \cdot Q$ oder mit Gl. (2.2) zu

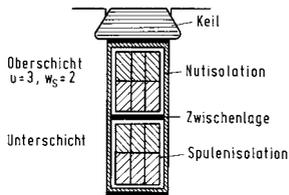


Bild 2.10 Querschnitt durch eine Ankermit parallelen Flanken und Rechteckdraht

$$z_A = 2 \cdot K \cdot N_s \quad (2.3)$$

Durchmesser- und Sehnwicklung. In der üblichen Darstellung der Ankerwicklung nummeriert man die Stäbe nach der Lamellenzahl und gibt alle Schaltverbindungen in Lamellenschritten an. So entspricht eine Polteilung einem Schritt von $K/2p$ Lamellen.

Als Spulenweite y_1 führt man entweder genau eine Polteilung oder etwas weniger aus (Bild 2.11). Im ersten Fall ergibt sich die Durchmesserwicklung mit

$$y_1 = \frac{K}{2p} \quad (2.4 \text{ a})$$

ansonsten die Sehnwicklung mit

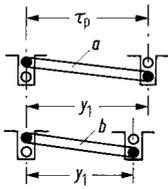


Bild 2.11 Bestimmung der Spulenweite
 a) Durchmesserwicklung
 b) gesehnte Wicklung

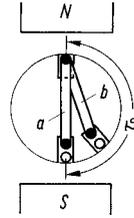


Bild 2.12 Darstellung der Spulenweite bei der zweipoligen Maschine
 a) Durchmesserwicklung
 b) gesehnte Wicklung

$$y_1 < \frac{K}{2p}$$

(2.4 b)

Beide Bezeichnungen ergeben sich aus der Darstellung (Bild 2.12) für die zweipolige Maschine.

Will man die u Spulenseiten einer Oberschicht auch in der Unterschicht in einer Nut beieinander haben, dann muss man die Spulenweite so wählen, dass sie durch u teilbar ist. Für diese Spulen gleicher Weite (Bild 2.13 a) gilt damit als Bedingung für den Nutschritt

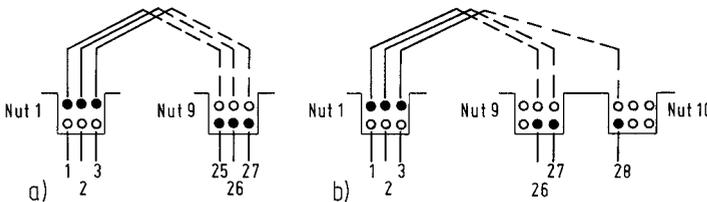


Bild 2.13 Lage von Ober- und Unterschicht einer Spule
 a) Spulen gleicher Weite $y_1 = 24, y_{1\Omega} = 8$
 b) Treppenwicklung $y_1 = 25, y_{1\Omega} = 8/8/9$

$$y_{1\Omega} = \frac{y_1}{u} = \text{ganzzahlig}$$

(2.5)

Erfüllt man diese Forderung nicht, so verteilen sich die u Spulenseiten der Unterschicht auf zwei Nuten (Bild 2.13 b) und man erhält eine Treppenwicklung. Letztere sind in der Herstellung aufwändiger als eine Wicklung mit Spulen gleicher Weite, wirken sich aber günstig auf die Stromwendung der Maschine aus (s. Abschn. 2.2.4).

Wicklungsarten. Für die Zusammenschaltung der einzelnen Spulen zu einer geschlossenen Wicklung und damit die Addition der Teilspannungen bestehen zwei grundsätzliche Möglichkeiten.

In der Schleifenwicklung (Bild 2.14) wird das Ende einer Spule unmittelbar mit dem Anfang der benachbarten verbunden. Auf diese Weise werden fortlaufend alle Spulenspannungen im Bereich eines Polpaares aufsummiert.

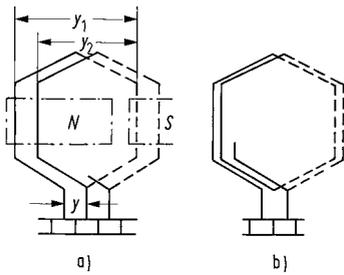


Bild 2.14 Schaltung einer Schleifenwicklung
 a) Eine Windung pro Spule, $N_s = 1$
 b) $N_s = 2$

Bei der Wellenwicklung (Bild 2.15) verbindet man das Ende einer Spule mit dem Anfang der gleich liegenden des nächsten Polpaars, so dass bereits durch p Spulen ein voller Umlauf um den Ankerumfang zurückgelegt ist. Jede Spule einer Wicklung kann bei beiden Wicklungsarten zusätzlich aus N_s in Reihe geschalteten Windungen (Bilder 2.14 b, 2.15 b) bestehen.

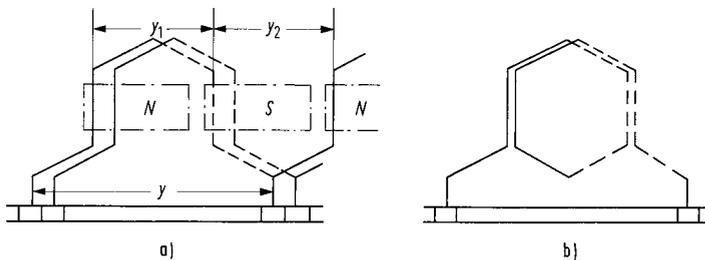


Bild 2.15 Schaltung einer Wellenwicklung
 a) Eine Windung pro Spule, $N_s = 1$
 b) $N_s = 2$

Außer durch die Spulenweite y_1 wird die Wicklung durch den Schrittwinkel y_2 und den Stromwenderschritt y festgelegt. Für die Schleifenwicklung gilt nach Bild 2.14

$$\boxed{y = 1} \quad (2.6 \text{ a})$$

mit $\boxed{y = y_1 - y_2} \quad (2.6 \text{ b})$

Bei der Wellenwicklung ist darauf zu achten, dass man nach einem Umlauf mit den p Spulen nicht auf die Ausgangslamelle trifft, was einem Kurzschluss gleichkäme. Für den Stromwenderschritt gilt daher

$$\boxed{y = \frac{K - 1}{p}} \quad (2.7 \text{ a})$$

womit der Umlauf eine Lamelle vor dem Anfang endet. Entsprechend Bild 2.15 gilt für die Wellenwicklung ferner

$$y = y_1 + y_2 \quad (2.7 \text{ b})$$

Schleifenwicklung. Am Beispiel einer vierpoligen Ausführung ist das gesamte Wicklungsschema (Bild 2.16) angegeben, wobei die Bürsten vereinfacht eine Lamellenteilung breit gewählt sind.

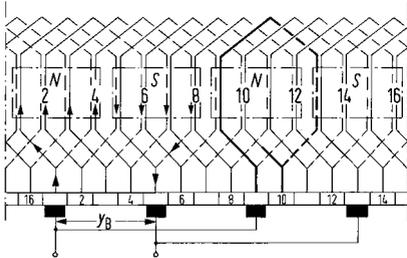


Bild 2.16 Schema einer vierpoligen Schleifenwicklung
 $K = 16, p = 2, y_1 = 4, y_2 = 3, y_B = 4$

Man erkennt, dass zwischen benachbarten Kohlebürsten alle Oberstäbe einer Polteilung und die zugehörigen Unterstäbe des benachbarten Hauptpoles, also $K/2p$ Spulen liegen. Die gesamte Ankerwindungszahl wird bei der Schleifenwicklung damit in $2p$ parallele Zweige aufgeteilt. Die für die Höhe der Gesamtspannung maßgebende Windungszahl zwischen zwei ungleichnamigen Kohlebürsten ist bei N_s Windungen/Spule damit

$$N = \frac{K \cdot N_s}{2p}$$

oder mit Gl. (2.3)

$$N = \frac{z_A}{4p}$$

Der gesamte Ankerstrom I_A teilt sich entsprechend auf und ergibt den Leiterstrom

$$I_s = \frac{I_A}{2p}$$

Die Aufteilung der gesamten Ankerleiterzahl in p parallele Zweigpaare ist nur dann möglich, wenn die Nutzahl des Ankers durch p teilbar ist. Für Schleifenwicklungen besteht also die Symmetriebedingung

$$\frac{Q}{p} = \text{ganzzahlig}$$

Wellenwicklung. Die Wellenwicklung vermeidet die Parallelschaltung der Wicklung nach Polpaaren (Bild 2.17). Durch den parallelen Eingang in Ober- oder Unterschicht von der Kohlebürste aus teilt sich die gesamte Windungszahl jedoch in zwei Teile auf und es gilt

$$N = \frac{z_A}{4}$$

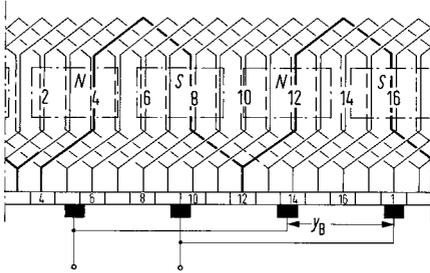


Bild 2.17 Schema einer vierpoligen Wellenwicklung $K = 17, \rho = 2, y_1 = 4, y_2 = 4, y = 8, y_B = 4,25$

und
$$I_s = \frac{I_A}{2}$$

Im Unterschied zur Schleifenwicklung, bei der eine Spule mit N_s Windungen zwischen benachbarten Lamellen liegt, ist dies bei der Wellenwicklung ein Umlauf mit p Spulen, d. h. $N_s \cdot p$ Windungen.

Ausgleichsverbindungen. Die bei einer Schleifenwicklung insgesamt vorhandenen $2p$ Ankerzweige sind erst durch die Verbindungsleitungen der gleichpoligen Kohlebürsten parallel geschaltet. Ersetzt man die in jedem der vier parallelen Zweige der Schleifenwicklung von Bild 2.16 induzierte Gesamtspannung durch eine Batterie mit der Quellenspannung U_q , so ergibt sich ein Schema nach Bild 2.18 a.

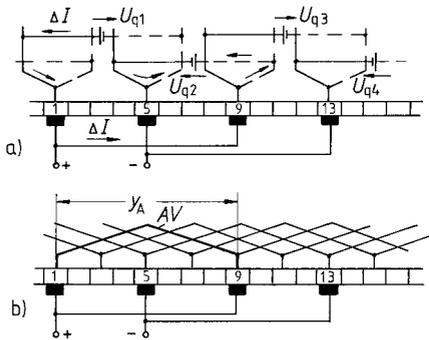


Bild 2.18 Ausgleichsverbindungen bei Schleifenwicklungen
 a) Ausgleichsstrom ΔI durch ungleiche Wicklungsspannungen infolge Unsymmetrien im Erregerfeld
 b) Schaltung der Ausgleichsverbindungen AV am Stromwender

Bei symmetrischem Aufbau der Maschine mit gleicher Flussdichte unter allen Hauptpolen werden die eingetragenen vier Einzelspannungen alle gleich groß sein, womit die Potentialdifferenz zwischen um eine doppelte Polteilung voneinander entfernten Lamellen, z. B. L1 bis L9, stets null ist. Besteht dagegen, evtl. durch einen etwas exzentrischen Einbau des Ankers, eine ungleiche Flussdichte unter den Polen, so wird z. B. $U_{q1} > U_{q2}$. Die Folge ist eine Potentialdifferenz zwischen den Kohlebürsten dieses Kreises, was zu hohen Ausgleichsströmen ΔI führt, welche über die äußeren Sammelringe fließen und den Kontakt Lamelle - Kohlebürste stark belasten.