

*Gerhard Müller, Karl Vogt
und Bernd Ponick*

**Berechnung elektrischer
Maschinen**

This Page Intentionally Left Blank

*Gerhard Müller, Karl Vogt
und Bernd Ponick*

**Berechnung elektrischer
Maschinen**

This Page Intentionally Left Blank

Germar Müller, Karl Vogt und Bernd Ponick

Berechnung elektrischer Maschinen

6., völlig neu bearbeitete Auflage



WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Gernar Müller
Technische Universität Dresden,
Elektrotechnisches Institut, Dresden, Deutschland
e-mail: gmuller@eti.et.tu-dresden.de

Prof. Dr. Karl Vogt
Dresden, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Bernd Ponick
Universität Hannover, Institut für Antriebssysteme
und Leistungselektronik, Hannover, Deutschland
e-mail: ponick@ial.uni-hannover.de

Titelbild

Feldbild einer zweipoligen Induktionsmaschine
mit Käfigläufer im Leerlauf

6., völlig neu bearbeitete Auflage 2008

Alle Bücher von Wiley-VCH werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

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.

© 2008 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co KGaA, Weinheim

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Fotokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Printed in the Federal Republic of Germany
Gedruckt auf säurefreiem Papier

Druck: betz-druck GmbH, Darmstadt
Satz: Steingraeber Satztechnik GmbH,
Dossenheim
Bindung: Litges & Dopf GmbH, Darmstadt

ISBN-13: 978-3-527-40525-1
ISBN-10: 3-527-40525-9

Vorwort zur 6. Auflage

Gegenstand der Berechnung einer elektrischen Maschine ist die Ermittlung der quantitativen Zusammenhänge der in ihr wirkenden physikalischen Mechanismen mit dem Ziel, Aussagen über die Dimensionierung und Gestaltung einzelner Bauteile, über die Betriebseigenschaften der Maschine sowie über ihre Lebensdauer zu gewinnen. Dieser Thematik widmet sich das vorliegende Buch *Berechnung elektrischer Maschinen*. Es knüpft dazu unmittelbar an die beiden Bände *Grundlagen elektrischer Maschinen* und *Theorie elektrischer Maschinen* an, was u. a. durch die Verwendung einheitlicher Termini und Formelzeichen sowie durch zahlreiche Bezugnahmen auf diese Bände zum Ausdruck kommt.

Das Buch ist ursprünglich als Hochschullehrbuch für Studierende des Fachgebiets elektrische Maschinen verfasst worden. Sein Hauptanliegen ist die klare Herausarbeitung der für die Berechnung elektrischer Maschinen wesentlichen physikalischen Zusammenhänge und deren analytische Erfassung. Deshalb werden – soweit das möglich ist – die Berechnungsbeziehungen oder zumindest deren Hauptabhängigkeiten aus den physikalischen Gegebenheiten hergeleitet, und deshalb wird auch – weil notwendig und vom Stand der Entwicklung unabhängig – vielfach auf die klassische Literatur über elektrische Maschinen Bezug genommen, die nebenbei bemerkt im deutschen Sprachraum eine weltweit einzigartige Qualität besitzt. Die analytisch formulierten Zusammenhänge bilden die Grundlage für den heute allgemein praktizierten rechnergestützten Entwurf und die ebenfalls rechnergestützte Nachrechnung elektrischer Maschinen, die sich dann mit Hilfe der zu allen Teilaspekten vorhandenen umfangreichen Spezialliteratur verfeinern lässt.

Unter dem Entwerfen einer elektrischen Maschine versteht man dabei die Ermittlung aller Abmessungen ihrer elektromagnetisch aktiven Bauteile, d. h. des Magnetkreises und der Wicklungen, aus den gewünschten Bemessungswerten von Leistung, Drehzahl und Spannung sowie ggf. unter Berücksichtigung zusätzlicher Bedingungen. Die Nachrechnung dient der Kontrolle des Entwurfs. Sie ist notwendig, weil der Entwurf wegen des Fehlens analytisch geschlossener Lösungen auf Erfahrungswerten basiert und weil sich die zusätzlichen Bedingungen meist nicht direkt rechnerisch

im Entwurf berücksichtigen lassen, so dass ihre Einhaltung überprüft werden muss. Die endgültige Kontrolle erfolgt selbstverständlich erst im Prüffeld und in manchen Fällen sogar erst bei der Inbetriebnahme. Dann ist die Maschine aber bereits gebaut, und notwendige Korrekturen sind – wenn überhaupt – nur bedingt möglich. Die Treffsicherheit der Berechnung hat also eine hohe wirtschaftliche Bedeutung, wobei verantwortungsbewusst zwischen Rechenaufwand und Ergebnisgenauigkeit abgewogen werden muss. Das vorliegende Buch ist daher auch als wichtiges Hilfsmittel für alle mit der Entwicklung elektrischer Maschinen befassten Ingenieure gedacht.

Die Behandlung der einzelnen Berechnungsgänge aller vorkommenden elektrischen Maschinen scheidet an der Vielfalt hinsichtlich der Wirkungsweise, der Ausführungsform und der Betriebsbedingungen. Selbst wenn man nur eine Auswahl der wichtigsten Arten elektrischer Maschinen berücksichtigt, ist eine solche nach Maschinenarten getrennte Behandlung nicht sinnvoll, da in allen Berechnungsgängen viele gemeinsame Berechnungselemente enthalten sind. Das Buch ist deshalb in erster Linie nach diesen Berechnungselementen gegliedert. Um wesentliche Zusammenhänge deutlich hervorzuheben, beschränken sich die dargestellten Berechnungsbeispiele auf wichtige und typische elektrische Maschinen.

Im ersten Kapitel werden die Wicklungen elektrischer Maschinen behandelt. Gegenüber den früheren Ausgaben wurde vor allem die Herleitung der Wicklungsfaktoren von Strangwicklungen erweitert und verallgemeinert. Neu ist auch die Verwendung des Görjes-Diagramms zur Beurteilung der Qualität einer Wicklung und zur geschlossenen Berechnung der Oberwellenstreuung.

Auch die folgenden Kapitel wurden grundlegend überarbeitet. Die Berechnung des magnetischen Kreises im Kapitel 2 dient der Dimensionierung aller flussführenden Teile sowie der Erregerwicklung oder der permanentmagnetischen Abschnitte im magnetischen Kreis bzw. der Ermittlung des Magnetisierungsstroms von Induktionsmaschinen. Die rechnerische Behandlung der Stromwendung im Kapitel 4 liefert Angaben zur Dimensionierung von Wendepolwicklungen. Die Berechnung der Kräfte im Kapitel 7 ist Voraussetzung für die konstruktive Gestaltung. Grundlage für eine Aussage über die Lebensdauer einer Maschine ist vor allem die Berechnung der Erwärmung auf Basis der nach Kapitel 6 ermittelten Verluste. Die rechnerische Erfassung der Erscheinungen der Streuung im Kapitel 3 und der Stromverdrängung im Kapitel 5 sowie die Bestimmung der Induktivitäten bzw. Reaktanzen und Zeitkonstanten im Kapitel 8 dienen der Vorausbestimmung der Betriebseigenschaften einer Maschine.

Das letzte Kapitel befasst sich mit dem Entwurf und den Berechnungsgängen der wichtigsten Arten elektrischer Maschinen. Es wurde stark überarbeitet und enthält nun Abschnitte zum Grobentwurf, zum Vorgehen bei der weiteren Dimensionierung und der analytischen Nachrechnung sowie zur Umrechnung von Wicklungen. Neu ist auch der Abschnitt zur numerischen Feldberechnung, der insbesondere Aspekte bei deren praktischer Anwendung aufgreift. In Bezug auf die angegebenen Erfahrungswerte für die elektromagnetischen Beanspruchungen muss bemerkt werden, dass diese grund-

sätzlich noch gesteigert werden könnten. Eine übertriebene Genauigkeit bei der Angabe von Erfahrungsfaktoren scheint von vornherein wenig sinnvoll, da diese erstens für ohnehin nicht genau fassbare analytische Zusammenhänge stehen und zweitens erheblich von den sehr unterschiedlichen fertigungstechnischen und konstruktiven Gegebenheiten der Herstellerbetriebe abhängig sind.

Auf die in den Voraufgaben enthaltenen Berechnungsbeispiele musste aus Platzgründen verzichtet werden. Sie sind nun für die Leser unter der Internetadresse <http://www.wiley-vch.de/publish/dt/books/ISBN3-527-40525-9> abrufbar. Unter dieser Adresse erhalten die Leser auch Hinweise für den kostenlosen Bezug des numerischen Feldberechnungsprogramms FEMAG, das auf die Berechnung elektrischer Maschinen besonders zugeschnitten ist.

Die Neuauflage dieses Bands – wie schon des im Jahr 2005 erschienenen Bands *Grundlagen elektrischer Maschinen* – wird gemeinsam von Prof. Müller als dem bisherigen Herausgeber der Reihe *Elektrische Maschinen* des Verlages Wiley-VCH und von Prof. Ponick als neuem Mitherausgeber bearbeitet, die nun beide als Mitautoren fungieren. Prof. Vogt, der Autor der fünf bisherigen Ausgaben, sah sich bedauerlicherweise nicht in der Lage, an dieser Neuauflage mitzuwirken.

Es ist uns ein Bedürfnis, an dieser Stelle allen Fachkollegen zu danken, die uns bei der vorliegenden Überarbeitung unterstützt haben, insbesondere Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Konrad Reichert, der den Abschnitt zur numerischen Feldberechnung verfasst hat, sowie den Herren Prof. Dr. sc. nat. Jürgen Schneider und Dr.-Ing. Frank Jurisch für wertvolle Informationen zu Magnetmaterialien. Unser Dank gilt auch Frau Duensing und Herrn Kriese, die uns mit Sorgfalt bei der Bearbeitung von Bildern und dem Setzen des Texts unterstützt haben, sowie Frau Wind, die sich der Mühe des Korrekturlesens unterzogen hat. Nicht zuletzt gilt unser Dank dem Verlag Wiley-VCH, Weinheim, insbesondere Frau Werner, für die angenehme Zusammenarbeit und die Möglichkeit, das Werk in nunmehr sechster Auflage erscheinen zu lassen.

Dresden und Hannover
im Juni 2007

Gerhard Müller
Bernd Ponick

This Page Intentionally Left Blank

Vorwort zur 1. Auflage (1972)

Das vorliegende Buch ist als Lehrbuch für Studierende des Fachgebiets elektrische Maschinen verfasst worden. Darüber hinaus wendet es sich an die in der Praxis stehenden Ingenieure. Es soll ihnen helfen, ihre Kenntnisse um den physikalischen Kern der Berechnungsformalismen zu erweitern und zu vertiefen und damit eine Voraussetzung für die Weiterentwicklung dieser Formalismen schaffen.

Das Buch knüpft unmittelbar an die beiden Bücher von G. Müller *Grundlagen elektrischer Maschinen* und *Theorie rotierender elektrischer Maschinen* an. Verweise auf diese Bücher sind im Text durch die Kurzbezeichnungen Grdl. und Th. gekennzeichnet worden. Weitere zitierte Bücher sind im Literaturverzeichnis angegeben. Auf spezielle Literatur wird in Fußnoten verwiesen.

Entsprechend der Aufgabe eines Lehrbuchs ist die klare Herausarbeitung der für die Berechnung elektrischer Maschinen wesentlichen physikalischen Zusammenhänge und deren analytische Formulierung das Hauptanliegen des Buches. Daraus resultieren nachstehende Folgerungen für die gewählte Darstellung des Stoffes. Soweit z. Z. möglich ist, werden die Berechnungsbeziehungen oder zumindest deren Hauptabhängigkeiten aus den physikalischen Gegebenheiten hergeleitet. Jedem Abschnitt ist ein einleitender Überblick über die behandelte Problematik vorangestellt. Um wesentliche Zusammenhänge deutlich hervorzuheben, beschränken sich die angegebenen Beispiele auf wichtige und typische Fälle. Das gilt auch für die Aufbereitung der Berechnungsaufgaben für die rechentechnische Bearbeitung. Die Gliederung des Buches erfolgt in erster Linie nach den grundsätzlichen Berechnungs- und Entwurfsaufgaben, die allen oder zumindest mehreren elektrischen Maschinen gemeinsam sind.

Im ersten Hauptabschnitt werden die Wicklungen elektrischer Maschinen behandelt. Dabei führt die konsequente Herleitung der Wicklungsgesetze für Ankerwicklungen aus allgemeingültigen, bereits im Buch *Theorie rotierender elektrischer Maschinen* fixierten Ansätzen zu einigen bisher nicht üblichen Darstellungen. Das betrifft vor allem den Nutzenstern der Ankerwicklungen.

Der zweite Hauptabschnitt ist der Darstellung der Berechnungselemente gewidmet. Gegenstand dieser Darstellung ist die Ermittlung der quantitativen Zusammenhänge

der in den elektrischen Maschinen wirkenden Größen als Grundlage für die Auslegung dieser Maschinen. Die Behandlung des magnetischen Kreises erstreckt sich dabei bis zur Bestimmung der Luftspaltfeldkurven unter Berücksichtigung der Sättigung in den ferromagnetischen Teilen und bis zur Ermittlung des Einflusses der Belastungsströme. Im Abschnitt über Wärmeabführung in elektrischen Maschinen ist auch die Berechnung von Lüftern enthalten. Behandelt werden außerdem Streuung, Stromwendung, Stromverdrängung, Verluste, Kräfte, Induktivitäten, Reaktanzen und Zeitkonstanten.

Die beiden letzten Abschnitte befassen sich mit dem Entwurf und der Berechnung der wichtigsten elektrischen Maschinenarten. Wenn auch ein völliger Neuentwurf ohne besondere zusätzliche Bedingungen kaum noch praktische Bedeutung hat, muss er dennoch als grundlegende Voraussetzung für das Verständnis praktischer Entwurfsverfahren behandelt werden. Danach erfolgt die Darstellung des Maschinenentwurfs unter Berücksichtigung zusätzlicher Bedingungen. Dabei wird auch auf Optimierungsprobleme eingegangen. Den Abschluss bilden Berechnungsgänge und Berechnungsbeispiele.

Bei der Bearbeitung des Buches ist mir tatkräftige Hilfe zuteil geworden. Herr Prof. Dr.-Ing. habil. G. Müller hat den Abschnitt über Kräfte in elektrischen Maschinen verfasst und mir im Hinblick auf eine optimale Stoffdarstellung sein eigenes Vorlesungsmanuskript zur Verfügung gestellt. Mit den daraus erhaltenen Anregungen sowie durch zahlreiche persönliche Ratschläge trägt er erheblichen Anteil am Gelingen des Buches. Der Abschnitt über Wärmeabführung in elektrischen Maschinen ist von Herrn Dr. rer. nat. W. Reibetanz, Herrn Dipl.-Ing. Schubert und Herrn Dipl.-Ing. Eberhardt, TH Ilmenau, Sektion Elektrotechnik, erarbeitet worden. Die kritische Durchsicht des Manuskripts durch Herrn Dr.-Ing. Pfeifer und weitere Assistenten des Lehrgebiets elektrische Maschinen an der TU Dresden, Sektion Elektrotechnik, hat zu mancher Verbesserung geführt. Dem VEB Kombinat Elektromaschinenbau und dem VEB Bergmann Borsig bin ich durch viele zur Verfügung gestellte Maschinenbeispiele verbunden. Besonders verpflichtet fühle ich mich dem VEB Verlag Technik und vor allem seinem Lektor, Herrn Fischmann, für die gute Zusammenarbeit. Ihnen allen danke ich herzlich für die erwiesene Hilfe und das wohlwollende Entgegenkommen.

Dresden

Karl Vogt

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 6. Auflage	V
Vorwort zur 1. Auflage	IX
Formelzeichen	XVII
1	Wicklungen rotierender elektrischer Maschinen 1
1.1	Allgemeine Bezeichnungen und Gesetzmäßigkeiten 2
1.1.1	Allgemeine Bezeichnungen von am Energieumsatz beteiligten Wicklungen 3
1.1.2	Allgemeine Gesetzmäßigkeiten von am Energieumsatz beteiligten Wicklungen 12
1.2	Wicklungen mit ausgebildeten Strängen 20
1.2.1	Wicklungsgesetze 21
1.2.2	Wicklungsentwurf 37
1.2.3	Bestimmung des Wicklungsfaktors 79
1.2.4	Aussagen des Görjes-Diagramms 97
1.2.5	Bewertung der Entwürfe 101
1.2.6	Wicklungsdimensionierung 113
1.3	Kommutatorwicklungen 124
1.3.1	Wicklungsgesetze und Wicklungsbezeichnungen 125
1.3.2	Wicklungsentwurf 145
1.3.3	Wicklungsdimensionierung 161
1.4	Weitere Wicklungsarten 166
1.4.1	Wicklungen auf ausgeprägten Polen 167
1.4.2	In Nuten verteilt angeordnete Wicklungen 169
2	Magnetischer Kreis 175
2.1	Feldgleichungen und deren allgemeine Aussagen 176

- 2.1.1 Allgemeine Aussagen der Feldgleichungen für die Berechnung magnetischer Kreise 176
- 2.1.2 Prinzipieller Berechnungsgang bei der konventionellen Magnetkreisberechnung 180
- 2.2 Ermittlung magnetischer Felder 186
- 2.2.1 Feldgebiete konstanter Permeabilität ohne Durchflutung 186
- 2.2.2 Feldgebiete konstanter Permeabilität mit Durchflutung 191
- 2.3 Luftspaltfelder 194
- 2.3.1 Einfluss von Polform und Durchflutungsverteilung auf das Luftspaltfeld als ebenes Feld ohne Einfluss der Nutung 195
- 2.3.2 Einfluss der Unterbrechungen der Luftspaltbegrenzungsflächen auf das Luftspaltfeld 200
- 2.4 Charakteristische Abschnitte des ferromagnetischen Teils des magnetischen Kreises 212
- 2.4.1 Abschnitte mit annähernd homogenen Feldern 213
- 2.4.2 Abschnitte mit sich längs des Integrationswegs ändernder Querschnittsfläche 214
- 2.4.3 Abschnitte mit längs des Integrationswegs veränderlichem Fluss 219
- 2.5 Gegenseitige Beeinflussung der Abschnittfelder 229
- 2.5.1 Einführende Betrachtung zur gegenseitigen Beeinflussung der Abschnittfelder 230
- 2.5.2 Iterative Ermittlung der gegenseitigen Beeinflussung 235
- 2.5.3 Konzentrierte Erregerwicklung 237
- 2.5.4 Verteilte erregende Wicklung bei gleichmäßiger Nutung 241
- 2.5.5 Verteilte erregende Wicklung bei ungleichmäßiger Nutung 245
- 2.6 Bestimmung der Leerlaufkennlinie 249
- 2.6.1 Gleichstromerregung mit konzentrierter Erregerwicklung 250
- 2.6.2 Gleichstromerregung mit verteilt angeordneter Erregerwicklung 254
- 2.6.3 Mehrphasige Wechselstromerregung 256
- 2.6.4 Sonderfälle der Erregung 259
- 2.7 Einfluss der Belastungsströme auf das Feld der erregenden Wicklung 263
- 2.7.1 Maschinen mit linearer Durchflutungsverteilung der Belastungsströme 264
- 2.7.2 Maschinen mit konstantem Luftspalt und sinusförmiger Durchflutungsverteilung der Belastungsströme 268
- 2.7.3 Maschinen mit nicht konstantem Luftspalt und sinusförmiger Durchflutungsverteilung der Belastungsströme 275
- 2.8 Erregung durch permanentmagnetische Abschnitte 280
- 2.8.1 Entmagnetisierungskennlinie 281
- 2.8.2 Reversible Kennlinie 283
- 2.8.3 Hartmagnetische Werkstoffe 285
- 2.8.4 Dimensionierung von permanentmagnetischen Abschnitten 286
- 2.8.5 Flusskonzentration 288

- 2.8.6 Einfluss der Ankerrückwirkung 292

- 3 Streuung 295**
 - 3.1 Allgemeine Erscheinungen und ihre Bezeichnungen 295
 - 3.2 Einführung der Teilstreufelder 297
 - 3.3 Spaltstreuung als Teil der Gesamtstreuung eines Wicklungspaares 299
 - 3.4 Gesamtstreuung eines Wicklungspaares 302
 - 3.5 Prinzipielle Vorgehensweise zur Berechnung der Streuung 309
 - 3.5.1 Prinzipielle Vorgehensweise zur Berechnung von Streuflüssen 309
 - 3.5.2 Prinzipielle Vorgehensweise zur Berechnung von Streuflussverkettungen 311
 - 3.6 Ermittlung von Streuflüssen in der Berechnungspraxis 318
 - 3.6.1 Nut-Zahnkopf-Streufluss 318
 - 3.6.2 Polstreufluss ausgeprägter Pole 321
 - 3.7 Ermittlung von Streuflussverkettungen in der Berechnungspraxis 323
 - 3.7.1 Nut- und Zahnkopfstreuung 323
 - 3.7.2 Wicklungskopfstreuung 332
 - 3.7.3 Oberwellenstreuung 335
 - 3.7.4 Polstreuung 341

- 4 Stromwendung 345**
 - 4.1 Stromwendevorgang 346
 - 4.1.1 Phasen des Stromwendevorgangs 346
 - 4.1.2 Prinzipieller Verlauf der Stromwendung 349
 - 4.1.3 Beanspruchung des Bürstenkontakts 353
 - 4.2 Prinzipielle analytische Behandlung der Stromwendung 354
 - 4.2.1 Maschengleichung der kommutierenden Masche 354
 - 4.2.2 Wendezone 355
 - 4.2.3 Gleichungssystem zur Berechnung der Stromwendung 359
 - 4.2.4 Betrachtungen zur Lösung des Gleichungssystems 360
 - 4.3 Genäherte Berechnung der Stromwendung 364
 - 4.3.1 Verlauf der Ankerreaktanzspannung 364
 - 4.3.2 Mittlere Ankerreaktanzspannung 367
 - 4.3.3 Wendepolwicklung 369
 - 4.4 Möglichkeiten zur Beeinflussung der Stromwendung 378
 - 4.4.1 Einfluss der Bürsten 378
 - 4.4.2 Einfluss der Wicklungsdimensionierung und der Wendepolgestaltung 382

- 5 Stromverdrängung 385**
 - 5.1 Prinzipielle Abhängigkeiten der Stromverdrängung 385
 - 5.1.1 Ermittlung der prinzipiellen Abhängigkeiten 386

5.1.2	Gesichtspunkte für die Wicklungsdimensionierung	388
5.2	Veranschaulichung der Erscheinung der Stromverdrängung	391
5.2.1	Einseitige Stromverdrängung	392
5.2.2	Zweiseitige Stromverdrängung	396
5.2.3	Definition von Parametern	397
5.3	Analytisch geschlossene Berechnung der Stromverdrängung	400
5.3.1	Entwicklung der Grundgleichungen	401
5.3.2	Massive Leiter	404
5.3.3	Unterteilte Leiter	414
5.3.4	Kunststäbe	421
5.3.5	Kommutatorwicklungen	423
6	Verluste	427
6.1	Energiebilanz der elektrischen Maschine	427
6.1.1	Verluste und Wirkungsgrad	427
6.1.2	Nachweis des Wirkungsgrads	430
6.2	Mechanische Verluste	432
6.2.1	Verluste durch Gas- und Lagerreibung	432
6.2.2	Verluste durch Bürstenreibung	433
6.3	Grundverluste in den Stromkreisen	434
6.3.1	Eigenschaften der Leitermaterialien	434
6.3.2	Wicklungswiderstände	435
6.3.3	Wicklungsverluste	438
6.3.4	Bürstenübergangsverluste	439
6.4	Grundverluste im magnetischen Kreis	440
6.4.1	Eigenschaften des Magnetmaterials	441
6.4.2	Ermittlung der Ummagnetisierungsgrundverluste in der Berechnungspraxis	452
6.5	Zusätzliche Verluste	453
6.5.1	Zusätzliche Verluste durch Oberwellen im Luftspaltfeld	454
6.5.2	Zusätzliche Stromwärmeverluste in Ständer- und Läuferwicklungen durch Oberschwingungen des speisenden Stroms	464
6.5.3	Zusätzliche Verluste durch Stromverdrängung in Wicklungen	465
6.5.4	Quellen weiterer zusätzlicher Verluste	465
7	Kräfte	467
7.1	Allgemeine Beziehungen zur Ermittlung der Kräfte	467
7.1.1	Ermittlung der Kräfte auf stromdurchflossene Leiter, ausgehend von den Feldgrößen	468
7.1.2	Ermittlung der Grenzflächenkräfte	468
7.1.3	Ermittlung der Kräfte aus der Induktivitätsänderung	469

- 7.2 Tangentiale Kräfte auf Blechpakete 470
- 7.3 Radiale Kräfte auf Blechpakete 472
 - 7.3.1 Allgemeine Erscheinungen 472
 - 7.3.2 Zugspannungswellen des resultierenden Luftspaltfelds und ihre Wirkung 476
 - 7.3.3 Magnetische Geräusche 478
 - 7.3.4 Einseitiger magnetischer Zug 481
- 7.4 Axiale Kräfte auf Blechpakete 485
 - 7.4.1 Allgemeine Erscheinungen 485
 - 7.4.2 Axiale Kräfte aufgrund des Luftspaltfelds 486
 - 7.4.3 Axiale Kräfte aufgrund des Streufelds des Wicklungskopfs 493
- 7.5 Kräfte auf in Nuten eingebettete Leiter 494
 - 7.5.1 Tangentiale Kräfte 494
 - 7.5.2 Radiale Kräfte 496
- 7.6 Kräfte auf die Leiter im Wicklungskopf 500
 - 7.6.1 Allgemeine Erscheinungen und Beziehungen 500
 - 7.6.2 Vereinfachte Berechnung 504

- 8 Induktivitäten, Reaktanzen und Zeitkonstanten 511**
 - 8.1 Induktivitäten und Reaktanzen 511
 - 8.1.1 Grundlegende Zusammenhänge 511
 - 8.1.2 Induktivitäten und Reaktanzen des Luftspaltfelds 515
 - 8.1.3 Streuinduktivitäten und Streureaktanzen 532
 - 8.1.4 Charakteristische Induktivitäten und Reaktanzen 539
 - 8.2 Zeitkonstanten 550
 - 8.2.1 Eigenzeitkonstanten 551
 - 8.2.2 Charakteristische Zeitkonstanten 555

- 9 Entwurfs- und Berechnungsgänge 563**
 - 9.1 Grobentwurf 564
 - 9.1.1 Entwurfsgleichung 565
 - 9.1.2 Entwurfsrichtwerte 578
 - 9.2 Detaillierte Dimensionierung und analytische Nachrechnung 588
 - 9.2.1 Grundsätzliches Vorgehen 588
 - 9.2.2 Gleichstrommaschinen 590
 - 9.2.3 Induktionsmaschinen 595
 - 9.2.4 Synchronmaschinen 601
 - 9.2.5 Kleinmaschinen 606
 - 9.2.6 Optimierung des Entwurfs 610
 - 9.3 Nachrechnung mit Hilfe numerischer Feldberechnung von K. Reichert 613
 - 9.3.1 Grundlagen 613

9.3.2	Numerische Feldberechnungsmethoden	620
9.3.3	Anwendung numerischer Feldberechnungsmethoden	627
9.3.4	Praktischer Einsatz der Finite-Elemente-Methode zur numerischen Feldberechnung	638
9.4	Wicklungsumrechnung	649
9.4.1	Anpassung an eine andere Bemessungsspannung	649
9.4.2	Beeinflussung der charakteristischen Reaktanzen	650
9.4.3	Berechnung einer Maschinenreihe	651

Literaturverzeichnis 655

Sachverzeichnis 659

Formelzeichen

a	Zahl der parallelen Zweige bei Strangwicklungen	f_d	Eigenfrequenz
a	Zahl der parallelen Zweigpaare bzw. Kreise bei Kommutatorwicklungen	f_M	Magnetisierungskurve
\bar{a}	Zahl der parallelen Zweige, allgemein	$f_{MK}(\Theta)$	Magnetisierungskennlinie
\underline{a}	$e^{j2\pi/3}$	f_δ	Feldform
a	Abstand, Länge	F	Kraft
a, b, c	Strangbezeichnungen einer Drehstromwicklung	$F(f)$	Frequenzfaktor
A, A	Fläche, Querschnittsfläche	g	ganze Zahl
A	Strombelag	g	Funktion, allgemein
A_m	magnetisches Vektorpotential	ggT	größter gemeinsamer Teiler
b	Breite, allgemein	\mathbb{G}	Menge der geraden natürlichen Zahlen
b	Bogenlänge	h	Höhe, allgemein
b_i	ideeller Polbogen	H, H	magnetische Feldstärke
$b_n(x)$	Feldform der Nutteilung	H_c	Koerzitivfeldstärke
b_{zg}	Zonenbreite einer Spulengruppe	i, I	Stromstärke, allgemein
B, B	magnetische Induktion	i_μ	Magnetisierungsstrom
B_r	Remanenzinduktion	Im	Imaginärteil einer komplexen Größe
B_{zs}	scheinbare Zahninduktion	j	imaginäre Einheit
c, C	Konstante, Faktor	J	Massenträgheitsmoment
c	Federkonstante	J, J	Magnetisierung
c	Maschinenkonstante der Gleichstrommaschine	k	ganze Zahl
c_m	Faktor zur Ermittlung der mittleren Ankerreaktanzspannung	k	Konstante, Faktor
C	Polformkoeffizient	k	Kommutatorstegzahl, Ankerspulen- zahl
C	Ausnutzungsfaktor	k	Faktor zur Berücksichtigung verlustvergrößernder Einflüsse
d	Dicke	k	Sättigungsfaktor
d	Gittermaß, Abstand	k_c	Carterscher Faktor
dg	Differential der Größe g	k_r	Widerstandsverhältnis zur Berücksichtigung der Stromverdrängung
D	Bohrungsdurchmesser	k_x	Reaktanzverhältnis zur Berücksichtigung der Stromverdrängung
D, D	Verschiebungsflussdichte	l	Länge, allgemein
e	Exzentrizität	l	Gesamtlänge des Blechpakets (einschl. radialer Kühlkanäle)
e, E	induzierte Spannung	l_{Fe}	reine Paketlänge (ohne Kühlkanäle)
e_r, E_r	Ankerreaktanzspannung	l_m	mittlere Windungslänge
e_{tr}, E_{tr}	Transformationsspannung	l_s	mittlere Leiter- bzw. Stablänge
E	Elastizitätsmodul	L	Induktivität, allgemein
E, E	elektrische Feldstärke	L_{aa}	Selbstinduktivität einer Wicklung a
f	Funktion, allgemein	L_{ab}	Gegeninduktivität zwischen zwei Wicklungen a und b
f	Frequenz	m	Strangzahl einer Strangwicklung
f	Streckenlast	m	Gangzahl einer Kommutatorwicklung

m	Maßstab, allgemein	Q	Zahl der Spulen einer Spulengruppe
m	Masse	r	Radius, allgemein
m	Leiterzahl in einer Nut	r	Zahl der Nutdurchgänge mit positiver Teilleiterfolge
m, M	Drehmoment	R	Widerstand
n	ganze Zahl	R_a	Rauheit
n	Drehzahl	Re	Realteil einer komplexen Größe
n	Nenner der Lochzahl q	s	Schlupf
n	Zahl der übereinander liegenden Leiter in einer Nut	s, s	Weg
\mathbf{n}	Einheitsvektor in Richtung der Flächennormalen	\mathbf{S}, S	Stromdichte
n_0	synchrone Drehzahl	t	Zeit
N	Nutzahl	t	Zahl der Kreise im Nutenspannungstern, Zahl der Urverteilungen
N'	Zahl der Strahlen im Nutenspannungstern, Nutzahl der Urverteilung	t^*	Zahl der Urverteilungen je Urwicklung, Zahl der Kreise im Nutenspannungstern der Urwicklung
N^*	Nutzahl der Urwicklung	t_s	Zahl der Schlüsse einer Kommutatorwicklung
\mathbb{N}	Menge der natürlichen Zahlen	T	Periodendauer
N_0	Zahl der freien (unbewickelten) Nuten	T	Zeitabschnitt
N_o	Zahl der Nuten, in denen der betrachtete Strang in der Oberschicht liegt	T	Zeitkonstante
N_u	Zahl der Nuten, in denen der betrachtete Strang in der Unterschicht liegt	T_C	Curie-Temperatur
N_v	Zahl der Nuten, in denen nur der betrachtete Strang liegt	T_k	Temperaturkoeffizient
N_g	Zahl der Nuten, in denen außer dem betrachteten Strang noch ein anderer liegt	T_m	elektromechanische Zeitkonstante
p	Polpaarzahl	u	Umfang
p	Druck	u	Zahl der in einer Schicht nebeneinanderliegenden Spulenseiten in einer Nut
p	Laplaceoperator	u, U	Spannung, allgemein
p_v	relative Verlustleistung	U_p	Polradspannung
p'	Polpaarzahl der Urverteilung	U, V, W	Klemmenbezeichnungen einer dreisträngigen Wicklung
p^*	Polpaarzahl der Urwicklung	\mathbb{U}	Menge der ungeraden natürlichen Zahlen
p, P	Leistung, allgemein	\ddot{u}	Betrag des komplexen Übersetzungsverhältnisses der Induktionsmaschine
P	Wirkleistung	\ddot{u}_h	reelles Übersetzungsverhältnis der Induktionsmaschine
P	Punkt	v	Umfangsgeschwindigkeit, Geschwindigkeit
P_i	innere Leistung	v	spezifische Verluste
P_q	Blindleistung	\bar{v}	Volumendichte der Verluste
P_s	Scheinleistung	V	magnetischer Spannungsabfall
P_v	Verlustleistung	V_o	magnetische Umlaufspannung
q	Lochzahl, Nutzahl je Pol und Strang	\mathcal{V}	Volumen
		w	Windungszahl, allgemein

w	Strangwindungszahl, Zweigwindungszahl	α_n	Nutenwinkel
w_m	magnetische Energiedichte	α_p	Abplattungsfaktor
W	Spulenweite	α_z	Zeigerwinkel
W_m	magnetische Energie	α_{ze}	Zonenwinkel im Nutenspannungstern
x	Koordinate, allgemein	α_{zg}	Zonenbreite der Spulengruppe in bezogenen Koordinaten
x	Längenkoordinate in Umfangsrichtung	β	Winkel, allgemein
x	bezogene Reaktanz	β	auf die Kommutatorstegteilung bezogene Größe
X	Reaktanz	β	reduzierte Leiterhöhe massiver Leiter
X_h	Hauptfeldreaktanz	β^*	reduzierte Leiterhöhe unterteilter Leiter
X_d	synchrone Längsreaktanz	β_v	auf die Kommutatorstegteilung bezogene Schrittverkürzung
X_q	synchrone Querreaktanz	γ	Winkel, allgemein
X_σ	Streureaktanz	γ	bezogene Winkelkoordinate ($= p\gamma'$)
y	Koordinate, allgemein	γ	Hilfsfaktor zur Berechnung von k_c
y	Verformung	γ	Phasenverschiebung zwischen den Strömen in Oberschicht und Unterschicht
y	Wicklungsschritt, allgemein	γ'	Winkelkoordinate
y_a	Schritt der Ausgleichsverbindungen	δ	Polradwinkel
y_r	resultierender Schritt	δ	Luftspaltlänge
y_v	Verkürzungsschritt	δ	Eindringmaß
y_1	erster Teilschritt, Spulenschritt	δ^*	Länge des Ersatzluftspalts
y_2	zweiter Teilschritt, Schaltschritt	δ_i	ideelle Luftspaltlänge unter Berücksichtigung der Nutung
y_\emptyset	Durchmesserschritt (unge-sehnte Spule)	δ_i''	ideelle Luftspaltlänge unter Berücksichtigung von Nutung und magnetischem Spannungsabfall im Eisen
z	Koordinate, allgemein	Δg	Änderung einer Größe g , Differenz
z	Leiterzahl, allgemein	ε	Winkel, allgemein
z	Leiterzahl je Strang	ε'	Nuttschrägungswinkel
z	Zähler der Lochzahl q	ε	zulässige Abweichung
\underline{Z}	komplexer Widerstand	ε	Dielektrizitätskonstante
Z	Zahl der zur Ermittlung des Wicklungsfaktors zu addierenden Zeiger	ε	bezogene Exzentrizität
\mathbb{Z}	Menge der ganzen Zahlen	ε''	magnetisch wirksame Exzentrizität
Z^+, Z^-	Zahl der Zeiger je Zone im Nutenspannungstern	ζ	Pichelmayerscher Kommutierungsfaktor
α	Winkel, allgemein	η	Koordinate, allgemein
α	Polbedeckungsfaktor	η	Wirkungsgrad
α	Reduktionsfaktor zur Ermittlung der reduzierten Leiterhöhe massiver Leiter	η	Spulenweite in bezogenen Koordinaten
α^*	Reduktionsfaktor zur Ermittlung der reduzierten Leiterhöhe unterteilter Leiter	η	Hilfsfaktor zur Berechnung des Widerstandsverhältnisses umgeschichteter unterteilter Leiter
α_e	Faktor zur Berücksichtigung vermindelter Flussverkettung		
α_i	ideeller Polbedeckungsfaktor		

η	Hilfsfunktion zur Kraftberechnung	ρ	Raumladungsdichte
η	Reduktionsfaktor	σ	Streukoeffizient
ϑ	Übertemperatur, Temperatur in der Celsius-Skala	σ	mittlerer Drehschub
ϑ	relative Kommutierungszeit	σ	spezifische Verluste
ϑ	Läuferlage	σ	Zugspannung
ϑ_w	relative Wendepoldurchflutung	τ	Teilung
Θ	Durchflutung	τ_n	Nutteilung
Θ	Durchflutungsverteilung (Felderregerkurve) des Luftspaltfelds	τ_p	Polteilung
κ	elektrische Leitfähigkeit	φ	Phasenlage einer Wechselgröße
λ	relativer magnetischer Leitwert	φ	Füllfaktor
λ	relative Länge	φ	elektrisches Potential
λ	Wellenlänge einer Feldharmonischen	φ_m	magnetisches Skalarpotential
λ	Ordnungszahl einer Oberschwingung	$\varphi(\beta)$	Hilfsfunktion zur Berechnung des Widerstandsverhältnisses
λ	Hilfsfunktion zur Kraftberechnung	$\varphi'(\beta)$	Hilfsfunktion zur Berechnung des Streuungsverhältnisses
λ_δ	relativer Luftspaltleitwert	Φ	magnetischer Fluss
A	magnetischer Leitwert	Ψ	Flussverkettung
μ	Permeabilität	$\Psi(\beta)$	Hilfsfunktion zur Berechnung des Widerstandsverhältnisses
μ'	Ordnungszahl bzw. Polpaarzahl einer Drehwelle	$\Psi'(\beta)$	Hilfsfunktion zur Berechnung des Streuungsverhältnisses
$\bar{\mu}'$	vorzeichenbehafteter Feldwellenparameter	ω	Kreisfrequenz
μ_0	Permeabilität des leeren Raums	Ω	mechanische Winkelgeschwindigkeit
μ_{Fe}	Permeabilität des Eisens		
μ_r	relative Permeabilität		
μ_{rb}	Reibungskoeffizient		
ν	bezogene Ordnungszahl bzw. Polpaarzahl einer Drehwelle		
ν'	Ordnungszahl bzw. Polpaarzahl einer Drehwelle		
$\bar{\nu}'$	vorzeichenbehafteter Feldwellenparameter		
ξ	Koordinate, allgemein		
ξ	Wicklungsfaktor		
ξ_{gr}	Gruppenfaktor, Zonenfaktor		
ξ_n	Nutslitzfaktor, Breitenfaktor		
ξ_{schr}	Schrägungsfaktor		
ξ_{sp}	Spulenfaktor, Sehnungsfaktor		
ρ	Dichte eines Stoffs		
ρ	bezogener Radius, Durchmesser Verhältnis		
ρ	Raumladungsdichte		

Indizes

a	Anker
a	Anzugs-
a	axial
a	Ausgleich
a	Strangbezeichnung
A	Arbeitsmaschine
ab	Abschnitt
ab	Abgabe
auf	Aufnahme
ä	Zonenänderung
b	bewickelt
b	Blindanteil, Imaginärteil
b	Strangbezeichnung
B	Bürste, Bürstenpaar
B	Induktion
bez	bezogen, Bezug
bez	Bezugswicklung
bl	blockierend
c	Strangbezeichnung
char	charakteristisch

cu	Kupfer	m	Mitsystem (symmetrische Komponente)
d	Längsachse, Längsfeldkomponente	m	stromunabhängig
d	elliptische Magnetisierung	max	Maximalwert
D	Dämpferkäfig	min	Minimalwert
e	Erregerwicklung	mech	mechanisch
el	elektrisch	M	Magnet, Magnetkreis
ers	Ersatz	MK	Magnetisierungskennlinie
F	Kraft	n	Normalkomponente
f	Fehler	n	Nut, Nutung
fd	Erregerwicklung bei Synchronmaschinen	n	nachlaufender Steg
Fe	Eisen, ferromagnetischer Werkstoff	n	allgemeine Bezifferung
g	gegeninduktiver Anteil	N	Bemessungsbetrieb, Bemessungswert
g	Gegensystem (symmetrische Komponente)	NH	Nutharmonische
g	Stanzgrat	o	Oberwelle
G	Gas	o	oberer, Oberschicht
gr	Spulengruppe	o	Oberfläche
gr	Grenzwert	opt	optimal
ges	gesättigter Wert	p	bezogen auf Hauptwelle
h	Hauptfeld	p	Pol
h	horizontal	P	Punkt
hyst	Hysterese	p	allgemeine Bezifferung
i	ideell	ph	Polhorn
i	induziert	pk	Polkern
i	Strom	pl	Pollücke
i	allgemeine Bezifferung	pn	Pulsation
irr	irreversibel	q	Querachse, Quersfeldkomponente
iso	Isolierung	r	Rücken
j	Joch	r	radial
j	allgemeine Bezifferung	r	Ring
J	Magnetisierung	r	relativ
k	Kurzschluss	r	rotatorisch
k	Kommutator	r	Widerstand
k	Kompensationswicklung	r	allgemeine Bezifferung
k	Keilgebiet	rb	Reibung
k	allgemeine Bezifferung	red	reduziert
krit	kritisch	res	resultierend
kipp	Kippunkt	rev	reversibel
l	Leerlauf	s	selbstinduktiver Anteil
L	Leiter, Leitergebiet	s	Schleifenwicklung
luft	Luft	s	Nutschlitz
m	magnetisch	s	Streusteggebiet
m	moduliert	s	Stab
m	räumlicher Mittelwert	s	scheinbar
		s	Schwerpunkt
		s	stromabhängig

sch	Polschuh	ν	Wicklungsstrang, allgemein
schr	Schrägung	ν	verkettete Wicklung
sp	Spule	ν	Teilgebiet
spt	Spalt	ν	bezogen auf ν . Harmonische
st	Steg	ν'	bezogen auf ν' . Harmonische
st	Stirnraum	$\tilde{\nu}'$	bezogen auf den Feldwellenparameter $\tilde{\nu}'$
str	Strang		
t	Tangentialkomponente	ξ, η	Komponenten
t	Teil	σ	Streuung, Streufeld
t	tatsächlich	σ	bezogen auf Zugbelastung
tr	transformatorisch	0	Bezugswert
u	Ummagnetisierung	0	bezogen auf Polmitte ($x = 0$), Hauptintegrationsweg
u	Spannung	0	Synchronismus
u	unterer, Unterschicht	0	Leerlauf
u	unbewickelt	0	Nullsystem (symmetrische Komponente)
ü	Übergang	0	
ü	Nutgebiet über dem Leitergebiet	1	Ständer
v	Verlust	1,0	bei 1,0 T
v	Ventilationskanal	1,5	bei 1,5 T
v	vorlaufender Steg	2	Läufer
v	vertikal	∞	bezogen auf $\mu_{Fe} = \infty$
vzb	vorzeichenbehafet	\sim	Wechselstrom
w	Stromwärme	\emptyset	bezogen auf den Durchmesser
w	Wicklung, Windung	λ	Sternschaltung
w	Wellenwicklung	Δ	Dreieckschaltung
w	Wicklungskopf	Δ	Differenz
w	Wendefeld, Wendepol		
w	Wirkanteil, Realteil		
w	Wechselmagnetisierung	\hat{x}	Amplitude
wb	Wirbel, Wirbelstrom	\bar{x}	zeitlicher Mittelwert
wz	Wendezone	\overline{xy}	Strecke
x,y,z	Komponenten	\underline{x}	komplexe Größe
z	Zahn	\tilde{x}	Unterscheidungskennzeichen, allgemein
z	Zahnkopf		
z	Zone	x^*	Unterscheidungskennzeichen, allgemein
z	Zusatz		
zul	zulässig	x^*	bezogene Größe
zw	Zweig einer Kommutatorwicklung	x'	Unterscheidungskennzeichen, allgemein
δ	Luftspalt	x'	auf die Ständerwicklung transformiert
ε	Exzentrizität		
λ	bezogen auf λ . Oberschwingung	x'	transienter Anteil
μ	Wicklungsstrang, allgemein	x''	Unterscheidungskennzeichen, allgemein
μ	erregende Wicklung	x''	subtransienter Anteil
μ	Magnetisierung	x^+, x^-	Vorzeichenhinweis

Zusätzliche Kennzeichnung der Größen

Wicklungen rotierender elektrischer Maschinen

Die prinzipielle Wirkungsweise einer elektrischen Maschine beruht auf Wechselwirkungen zwischen magnetischen Feldern und Wicklungen. Dabei bestimmen Konfiguration und Art des magnetischen Felds, Anordnung und Schaltung der Wicklungen sowie die an ihren Klemmen wirkenden elektrischen Größen im Wesentlichen das Betriebsverhalten und damit die Maschinenart. Im Hinblick auf die Aufgaben, die die Wicklungen im Wirkungsmechanismus der elektrischen Maschine zu erfüllen haben, unterscheidet man

- Wicklungen, die über die Deckung der Verluste hinausgehend am Energieumsatz beteiligt sind wie z. B.
 - Ankerwicklungen von Gleichstrommaschinen und Wechselstrom-Kommutatormaschinen,
 - Ankerwicklungen von Synchronmaschinen,
 - Dämpferwicklungen von Synchronmaschinen im asynchronen Betrieb,
 - Ständer- und Läuferwicklungen von Induktionsmaschinen.
- Wicklungen, die abgesehen von der Deckung der Verluste nicht am Energieumsatz beteiligt sind wie z. B.
 - Erregerwicklungen,
 - Wendepolwicklungen,
 - Kompensationswicklungen,
 - Dämpferwicklungen von Synchronmaschinen im synchronen Betrieb.

Ankerwicklungen sind Wicklungen, in denen die zum Energieumsatz erforderliche Spannung induziert wird. *Erregerwicklungen* erzeugen das zum Energieumsatz notwendige magnetische Feld, wenn dieses nicht, wie bei der Induktionsmaschine, bereits durch eine am Energieumsatz beteiligte Wicklung erregt wird. *Wendepolwicklungen* und *Kompensationswicklungen* sind Wicklungen, die Hilfsfelder zur Beeinflussung der Betriebseigenschaften einer Maschine erzeugen. Eine Sonderstellung nehmen die *Dämpferwicklungen* von Synchronmaschinen ein. Sie bewirken in erster Linie die Dämpfung unerwünschter Erscheinungen wie gegenlaufender Drehfelder und Pendelungen. Im

Asynchronbetrieb jedoch wirken sie wie die Läuferwicklungen von Induktionsmaschinen. Im Hinblick auf die geometrische Anordnung und innere Schaltung unterteilt man die wichtigsten Wicklungen in

- Wicklungen mit ausgebildeten Strängen,
- Kommutatorwicklungen,
- Wicklungen auf ausgeprägten Polen.

Die große Gruppe der sog. Wechselstromwicklungen wird durch Wicklungen gebildet, bei denen die in Nuten verteilten Einzelspulen zu einem oder mehreren Strängen zusammengeschaltet sind. In Nuten verteilte Wicklungen werden aber auch, z. B. bei Vollpol-Synchronmaschinen, als Erregerwicklungen ausgeführt. Bei Kommutatorwicklungen sind die in Nuten verteilten Einzelspulen zu einem oder mehreren in sich geschlossenen Kreisen zusammengeschaltet und mit einem Kommutator verbunden. Sie treten ausschließlich als Ankerwicklungen in Gleichstrommaschinen und in Wechselstrom-Kommutatormaschinen auf. Wicklungen auf ausgeprägten Polen sind normalerweise konzentriert ausgeführte Erregerwicklungen. Eine Sonderstellung nehmen die sog. Zahnspulenwicklungen ein, deren Spulen jeweils nur einen Zahn umfassen und die deshalb den Polspulen ähneln (s. Bild 1.1.2); da die Spulen jedoch immer zu – i. Allg. mehreren – Strängen zusammengeschaltet sind und mit Wechselstrom gespeist werden, gehören sie ebenfalls zur Gruppe der Wechselstromwicklungen.

Im ersten Kapitel werden die Kennzeichen und Gesetze sowie der Entwurf und die Dimensionierung der genannten Wicklungsarten behandelt. Dabei führen die besonderen Kennzeichen einer Wicklung i. Allg. zu spezielleren Wicklungsbezeichnungen. Unter dem Entwurf einer Wicklung ist die Zuordnung der in den einzelnen Nuten der elektrischen Maschine liegenden Wicklungsteile von Wicklungen mit ausgebildeten Strängen und Kommutatorwicklungen zu den Wicklungssträngen bzw. Wicklungszweigen zu verstehen. Das hat unter Beachtung der geltenden Wicklungsgesetze zu geschehen. Die Dimensionierung einer Wicklung besteht vor allem in der Ermittlung der zum gewünschten Energieumsatz notwendigen Windungszahl sowie der Aufteilung der Wicklung in parallele Zweige und einzelne Spulen, was ebenfalls den geltenden Wicklungsgesetzen Rechnung tragen muss. Im weiteren Sinne gehören zur Dimensionierung auch die Bestimmung der Leiterabmessungen und die Gestaltung der Isolierung.

1.1

Allgemeine Bezeichnungen und Gesetzmäßigkeiten

Wie aus der Einleitung unschwer zu ersehen ist, nehmen im Hinblick auf den Wicklungsentwurf und die Wicklungsdimensionierung die Wicklungen mit ausgebildeten Strängen und die Kommutatorwicklungen eine Sonderstellung ein. Das beruht auf

der großen Vielfalt dieser Wicklungen. Unabhängig von der Wicklungsart gibt es eine Anzahl von Bezeichnungen und Gesetzen, die allen über die Verlustdeckung hinausgehend am Energieumsatz beteiligten Wicklungen gemeinsam sind. Sie sollen zunächst behandelt werden.

Die Darstellung der räumlichen Verhältnisse in rotierenden elektrischen Maschinen kann wie im Band *Grundlagen elektrischer Maschinen* mit Hilfe der in Umfangsrichtung konzentrisch auf dem Bohrungsdurchmesser D verlaufenden *Längenkoordinate* x erfolgen. Häufig ist aber die Verwendung von *Polarkoordinaten* vorteilhaft. Zwischen der Längenkoordinate x in Umfangsrichtung und der *Winkelkoordinate* γ' besteht der Zusammenhang

$$\gamma' = \frac{2x}{D}. \quad (1.1.1)$$

Im Band *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschnitt 1.5.2, wird außerdem die *bezogene Winkelkoordinate*

$$\gamma = p\gamma' = \frac{2px}{D} \quad (1.1.2)$$

eingeführt, die im Folgenden ebenfalls, wo sinnvoll, verwendet wird. Winkelangaben im Koordinatensystem γ' werden z. T. auch als *mechanischer Winkel* und Winkelangaben im Koordinatensystem γ als *elektrischer Winkel* bezeichnet.

1.1.1

Allgemeine Bezeichnungen von am Energieumsatz beteiligten Wicklungen

Die wichtigsten Bezeichnungen für diejenigen Wicklungen, die am Energieumsatz über die Deckung der Verluste hinausgehend beteiligt sind, sind im Band *Theorie elektrischer Maschinen*, Abschnitt 1.4, angegeben. Dort werden auch die Wicklungsgesetze in der für das Verständnis erforderlichen Tiefe behandelt. Einige Angaben zur technischen Ausführung von Wicklungen sind auch bereits im Band *Grundlagen elektrischer Maschinen*, Abschnitt 2.3.1.2, zu finden. Im Hinblick auf eine eingehendere Behandlung von Wicklungen bedürfen die schon genannten Bezeichnungen natürlich einer inhaltlichen Erweiterung und einer Ergänzung durch neue Bezeichnungen. Dabei werden die schon eingeführten Bezeichnungen der Vollständigkeit halber noch einmal erwähnt.

1.1.1.1 Bezeichnung von Wicklungsteilen

Das natürliche Element einer Wicklung ist die *Spule*. Sie besteht aus mehreren unmittelbar neben- und/oder übereinander angeordneten und miteinander in Reihe geschalteten Windungen. Da innerhalb einer Spule kein Knotenpunkt existiert, werden alle Windungen der Spule vom gleichen Strom durchflossen.

Jede Spule einer in Nuten verteilten Wicklung belegt zwei Nuten des jeweiligen *Hauptelements*, d. h. des Ständers oder des Läufers, vollständig oder teilweise. Die in den beiden Nuten geradlinig verlaufenden Spulenteile heißen *Spulenseiten* und die Ver-

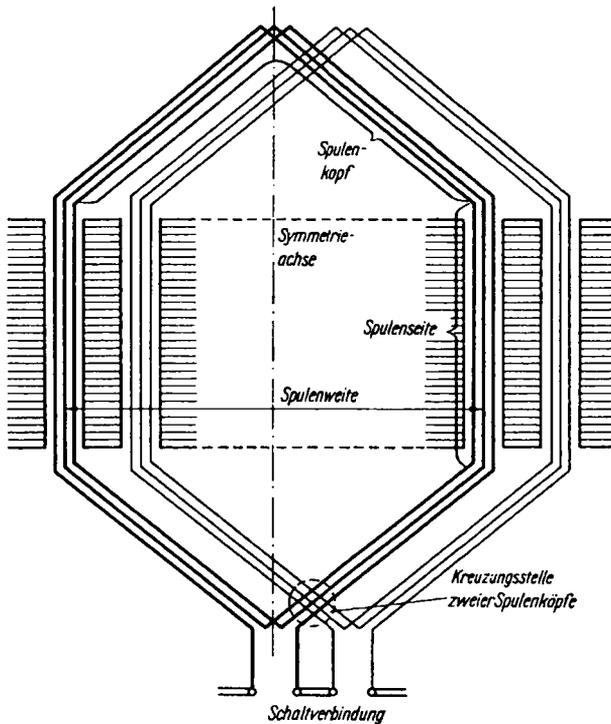


Bild 1.1.1 Bezeichnungen von Wicklungsteilen

bindungsteile zwischen den Spulenseiten *Spulenköpfe*, *Wicklungsköpfe* oder *Stirnverbindungen*. Mit *Spulenweite* bezeichnet man den Mittenabstand der beiden Spulenseiten, gemessen in Umfangsrichtung (s. Bild 1.1.1).

Die in der Spulenebene liegende Symmetrieachse einer Spule teilt diese in zwei Halbspulen bzw. jede Spulenzwicklung in zwei Halbwindungen oder *Leiter*. Besteht die Spule nur aus einer Windung, dann nennt man die Halbwindung *Stab*.

Wenn sich mehrere Spulenseiten in einer Nut befinden, dann sind diese meistens in zwei, seltener auch in mehr als zwei *Schichten* übereinander angeordnet. Innerhalb der einzelnen Schichten können auch mehrere Spulenseiten nebeneinander liegen. Da sich die Spulenköpfe der einzelnen Spulen kreuzen (s. Bild 1.1.1), müssen sie in mehreren *Ebenen* oder *Etagen* aneinander vorbeigeführt werden (s. Bild 1.1.4). Eine Ausnahme bilden in dieser Beziehung die sog. *Zahnspulenwicklungen* (s. Bild 1.1.2), bei denen die beiden Seiten einer Spule immer in benachbarten Nuten liegen.

Mittels *Schaltverbindungen* werden die Einzelspulen zur Wicklung zusammengeschaltet. Ein Wicklungsteil, der für die Speisung mit phasengleichen Strömen vorgesehen ist und im Normalfall zwischen zwei Klemmen eines Hauptelements (d.h. des Ständers oder Läufers einer Maschine) oder zwischen einer Klemme und dem Stern-



Bild 1.1.2 Stirnansicht einer Zahnspulenkwicklung (Werkbild Lenze)

punkt angeschlossen wird, wird als *Wicklungsstrang* oder kurz *Strang* bezeichnet. In Abgrenzung dazu ist es vielfach üblich, die Zuleitungen eines Mehrphasensystems, die die Stränge mit i. Allg. amplitudengleichen, jedoch zueinander phasenverschobenen elektrischen Größen speisen bzw. von der Maschine (im Fall eines Generators) entsprechend gespeist werden, als *Phasen* zu bezeichnen. Auf die Benutzung dieses in der Literatur oft mehrdeutig verwendeten Begriffes wird im Folgenden bewusst verzichtet.

Die Spulen eines Wicklungsstrangs müssen nicht alle in Reihe geschaltet werden, sondern es ist meist auch möglich, ihn mit mehreren parallelgeschalteten *Zweigen* in Reihe geschalteter Spulen auszuführen. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass bereits durch die Wicklungsanordnung eine gleichmäßige und phasengleiche Aufteilung des Stroms auf diese parallelen Zweige gewährleistet ist. Im Sonderfall existieren auch Teilparallelschaltungen (s. [1], Bd. III), bei denen z.B. ein Teil der Spulengruppen zueinander parallel liegen und diesen dann ein anderer Teil der Spulengruppen in Reihe geschaltet wird.

Mit *Spulengruppe* bezeichnet man eine Gruppe unmittelbar nebeneinander liegender Spulen eines Strangs. Die Spulen einer Spulengruppe sind häufig direkt in Reihe geschaltet. Den Anteil des Umfangs, den die Spulenseiten eines Strangs im Bereich einer Polteilung einnehmen, nennt man *geometrische Zone* oder *Wicklungszone*.

Die Bezeichnungen der einzelnen Wicklungsteile sind zunächst nur definiert worden. Auf eine ausführliche Erläuterung kann an dieser Stelle verzichtet werden. Sie ergibt sich aus den Ausführungen in den folgenden Abschnitten.

1.1.1.2 Bezeichnung von Wicklungen

Bestimmend für die allgemeine Bezeichnung ganzer Wicklungen sind die Spulenweite, die Spulenwindungszahl, die Zahl der Schichten, die Zahl der Wicklungskopfebene, die Form und Lage der Wicklungsköpfe, die Führung der Schaltverbindungen und die Herstellungsart der Spulen. Darüber hinaus existieren für die Wicklungen mit ausgebildeten Strängen und für die Kommutatorwicklungen noch spezielle Wicklungsbezeichnungen, die bei der Behandlung dieser Wicklungsarten eingeführt werden.

Ist die Spulenweite W der Spulen einer Wicklung gleich der Polteilung τ_p , das ist der längs des Bohrungsumfangs gemessene Achsenabstand aufeinander folgender Pole, so spricht man von *Durchmesserspulen*, da die Spulenköpfe bei einer zweipoligen Anordnung wie im Bild 1.1.3a einen Durchmesser bilden. Bei *gesehnten Spulen* ist die Spulenweite kleiner (oder auch größer) als die Polteilung, und die Spulenköpfe bilden bei einer zweipoligen Anordnung eine Sehne (s. Bild 1.1.3b). Wenn eine Wicklung ausschließlich aus Spulen gleicher Weite besteht, spricht man in Abhängigkeit von der Ausführung der Spulen von einer *Durchmesserwicklung* bzw. einer *gesehnten Wicklung* oder *Sehnenwicklung*. Wenn die Spulengruppen einer Wicklung aus coaxialen Spulen ungleicher Weite bestehen (s. Bild 1.1.4a), sind die einzelnen Spulen der Gruppe unterschiedlich gesehnt; die Gruppe als Ganzes kann aber wie eine aus Durchmesserspulen wirken.

Die *Spulenwicklung* hat Spulen mit einer Windungszahl w_{sp} , die größer als 1 ist. Besteht jede Spule einer Wicklung nur aus einer Windung, dann liegt eine *Stabwicklung*

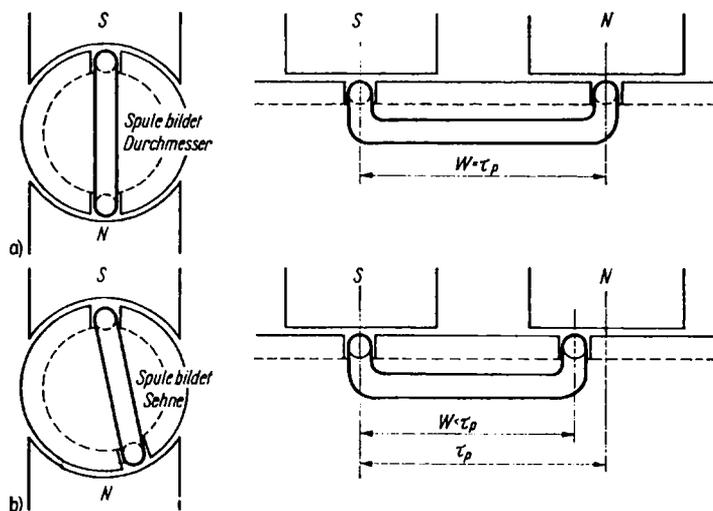


Bild 1.1.3 Bezeichnung einer Wicklung nach der Spulenweite.

- a) Durchmesserwicklung ($W = \tau_p$);
 b) gesehnte Wicklung ($W < \tau_p$)