

Konstruktion elektrischer Maschinen

Von

Eugen Wiedemann Walter Kellenberger

Mit 512 Abbildungen



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1967

EUGEN WIEDEMANN, Dr. sc. techn. h. c.
Honorarprofessor an der Techn. Hochschule Darmstadt,
Vize-Direktor der AG. Brown Boveri & Cie., Baden/Schweiz

WALTER KELLENBERGER, Dr. sc. techn.
Oberingenieur in der Techn. Direktion der AG. Brown Boveri & Cie.,
Baden/Schweiz

ISBN 978-3-662-12181-8 ISBN 978-3-662-12180-1 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-12180-1

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung in fremde Sprachen, vorbehalten.

Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es auch nicht gestattet,

dieses Buch oder Teile daraus auf photomechanischem Wege

(Photokopie, Mikrokopie) oder auf andere Art zu vervielfältigen

© by Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1967

Ursprünglich erschienen bei Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg 1967

Library of Congress Catalog Card Number 66-29247

Titelnummer 1338

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen
usw. in diesem Buche berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu
der Annahme, daß solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-
Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt
werden dürften

Vorwort

Das vorliegende Buch ist aus dem gemeinsam ausgearbeiteten und erweiterten Vorlesungsmanuskript „Konstruktion elektrischer Maschinen“ an der Technischen Hochschule Darmstadt entstanden.

Der erstgenannte Verfasser schöpfte dabei aus seiner mehr als 40-jährigen Konstruktionserfahrung bei verschiedenen europäischen Großfirmen. Der zweitgenannte bearbeitet als sein enger Mitarbeiter seit vielen Jahren die technisch-mechanischen Probleme des Elektro-Maschinenbaues und hat denn auch die diesbezüglichen Kapitel verfaßt.

Der Inhalt des Buches soll den Studierenden an Technischen Hochschulen und Ingenieurschulen vor allen Dingen das Verständnis für die elektrischen Maschinen vermitteln und ihnen, wie auch den in der Praxis stehenden Konstruktions- und Anlagen-Ingenieuren, als Nachschlagewerk dienen.

Es wurde, wo immer möglich, versucht, mit einfachen mathematischen Grundlagen auszukommen.

Das Buch behandelt die Konstruktion aller Arten von elektrischen Maschinen, mit Ausnahme von Kleinstmaschinen, deren Konstruktionsprobleme mehr feinerwerktechnischer Art sind und deshalb einer ganz anderen Behandlung bedürfen.

Zahlreiche Beispiele ausgeführter Maschinen, thermische und mechanische Berechnungen mit Beispielen und viele Konstruktionszeichnungen sollen dem Leser ein getreues Bild vom heutigen Stand des Elektromaschinenbaues vermitteln.

Da die Konstruktion elektrischer Maschinen auf vielseitige Kenntnisse zurückgreifen muß (Mechanik, insbesondere Festigkeits-, Schwingungs- und Strömungslehre, Wärmelehre, Technologie, Werkstoffkunde usw.), kann das Buch viele Probleme nur aufzeigen und kurz behandeln, muß aber für ein tieferes Eindringen in die Materie auf die Spezialliteratur verweisen. Hierzu dienen die Literaturangaben im Text und ein am Schluß des Buches aufgeführtes Verzeichnis von IEC-Publikationen und Fachbüchern.

Das Buch zerfällt in drei Teile. Der erste Teil enthält allgemeine Angaben und Unterlagen für die Konstruktion, einschließlich der Baustoffe. Der zweite Teil behandelt den mechanischen Gesamtaufbau elektrischer Maschinen, der auch dem Anlagen-Ingenieur dienen dürfte. Im dritten Teil sind die eigentlichen Bauelemente elektrischer Maschinen behandelt, wobei eingehender auf Wicklungen und deren Isolation, sowie auf mechanische Probleme eingegangen wird, die für elektrische Maschinen charakteristisch sind.

Da die technische Mechanik im heutigen Elektromaschinenbau besonders im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit, Leichtbauweise und Grenzleistungen immer mehr an Bedeutung gewinnt, wurde ihr bewußt viel Platz eingeräumt.

Wir danken den Firmen AEG, ASEA, BBC, Elin, Häny, MFO, Sécheron und SSW für die Beistellung von Zeichnungen und Abbildungen, insbesondere aber der Aktiengesellschaft Brown Boveri & Cie., Baden (Schweiz) und ihrem Herrn Direktor Dr. H. MEYER für die großzügige Förderung und Unterstützung.

Unser Dank gebührt auch unseren Mitarbeitern Herrn Dr. G. NEIDHÖFER, Herrn Dipl.-Ing. H. LARGIADER, Herrn Dipl.-Ing. M. SCHWARZ, Herrn Dr. phil. K. MICHEL, Herrn Ing. E. SCHNEIDER und anderen Kollegen, vor allem aber Herrn Obering. HR. BILL, welcher das Manuskript druckreif gestaltete. Dem Springer-Verlag endlich danken wir nicht nur für die bekannt vorbildliche Drucklegung und Herausgabe, sondern auch für seine Langmut bezüglich der Bereinigung des Manuskriptes.

Baden/Wettingen (Schweiz),
im April 1967

E. Wiedemann W. Kellenberger

Inhaltsverzeichnis

Erster Teil

Allgemeine Angaben und Unterlagen für die Konstruktion elektrischer Maschinen

	Seite
I. Einflüsse auf die Bauart	
A. Arbeitsweise	1
B. Stromart	1
C. Drehzahlverhalten	3
D. Erregungsarten	3
E. Kühlungsarten	4
F. Nennbetriebsarten	4
G. Schutzarten	7
H. Bauformen	16
I. Antriebsarten	31
J. Isolationsarten	31
K. Erwärmung	33
L. Mechanische und elektrische Belastbarkeit	43
M. Spannungen und Prüfspannungen	47
N. Schwungmoment	50
O. Transport	53
P. Vorschriften über den Bau elektrischer Maschinen	55
Q. Kühlung und Verluste	57
a) Mehrphasen-Synchronmaschinen	58
b) Gleichstrommotoren und Generatoren	72
c) Mehrphasen-Asynchron-Motoren und Asynchron-Generatoren	73
R. Abführung der Verlustwärme	74
a) Wärmeleitung	74
b) Wärmestrahlung	82
c) Konvektion	83
1. Freie Strömung	83
2. Erzwungene Strömung	84
d) Kombinierte Wärmeabgabe	94
e) Instationärer Betrieb	101
S. Die Laufruhe und das Auswuchten	104
a) Mechanische Unwucht	104
1. Starres Wuchten	105
2. Elastisches Wuchten	106
b) Thermische Unwucht	109
T. Geräusch und Körperschall	111
a) Schwingungen und Schall	111
b) Töne, Klänge, Geräusche	111

	Seite
c) Schalldruck und Schallstärke	112
d) Hör- und Schmerzschwelle	112
e) Lautstärke	112
f) Gesamtlautstärke mehrerer Schallquellen	115
g) Vergleich von Schallstärken und Schalldrücken in Dezibel	116
h) Ausbreitung des Schalles	117
i) Richtlinien für die Messung der Lautstärke elektrischer Maschinen	118
k) Quellen des Geräusches elektrischer Maschinen	118
l) Minderung des Schallpegels innerhalb der Maschine durch Kapselung	120
II. Baustoffe	
A. Stahl und Eisen	121
a) Gußeisen	121
b) Stahlguß	121
c) Gewalzter, geschmiedeter und gezogener Stahl	121
d) Stahlbleche	122
e) Dynamobleche	122
B. Nichteisenmetalle	124
a) Permanent-magnetisches Material	124
b) Kupfer	124
c) Messingguß, gezogenes und gewalztes Messing	125
d) Bronzeguß, geschmiedete, gezogene und gewalzte Bronze	126
e) Leichtmetalle	126
f) Lötmetalle und metallische Überzüge	127
g) Lagermetalle	129
C. Bandagen-Material	129
D. Isolierstoffe	129
E. Kühlmittel	130
a) Gasförmige Kühlmittel	130
b) Flüssige Kühlmittel	131
F. Kohlebürsten	131
G. Schmierfette für Wälzlager und Lageröl	132
a) Schmierfette für Wälzlager	132
b) Lageröl	133
c) Sonstige Schmiermittel	133
H. Dichtungsstoffe	133

Zweiter Teil

Mechanischer Gesamtaufbau elektrischer Maschinen

I. Synchronmaschinen	
A. Synchron-Generatoren und Synchronmotoren für Zusammenarbeit mit Kolbenmaschinen	153
B. Synchrongeneratoren und Synchronmotoren für Zusammenbau mit Wasserturbinen und Pumpen	158
a) Antrieb durch Turbinen	161
1. Antrieb durch horizontal gelagerte Pelton-turbinen	161
2. Antrieb durch horizontal oder vertikal gelagerte Francis- oder Propellerturbinen	162
3. Antrieb durch vertikal gelagerte Kaplan-turbinen	166
4. Antrieb durch horizontal oder schräg gelagerte Rohrturbinen	170

	Seite
b) Einfluß der Kraftwerksbauart auf die Konstruktion der Generatoren	173
1. Hochbauten mit normaler Innenaufstellung	173
2. Hochbauten mit stark reduziertem Krafthausvolumen	174
3. Kavernen für horizontale und vertikale Generatoren	175
4. Freiluftkraftwerke	175
c) Anordnung und Bauweise der Generatoren	175
d) Einphasen-Wasserkraft-Generatoren	178
e) Anordnung der Erreger- und Hilfsmaschinen	179
C. Schenkelpol-Generatoren und Synchronmotoren für Zusammenbau mit Dampf- oder Gasturbinen und mit Turbokompressoren	182
D. Synchronmaschinen für Umformer und Kurzschluß-Generatoren	183
E. Blindleistungsmaschinen	185
F. Mittelfrequenzgeneratoren	187
G. Permanentmagnetgeneratoren	190
H. Turbogeneratoren und Turbo-Synchronmotoren	192
a) Generatoren für Luftkühlung	198
b) Generatoren für Wasserstoffkühlung	200
c) Kombinierte Gas- und Flüssigkeitskühlssysteme	203
I. Wechselstromerreger mit rotierenden Erregergleichrichtern	206
 II. Gleichstrommaschinen	
A. Gleichstrom-Generatoren	210
a) Leonard-Generator	210
b) Hochstrom-Generatoren	213
c) Dieselgeneratoren	213
d) Gleichstromgeneratoren für Turbinen-Antrieb	215
e) Unipolarmaschinen	215
f) Pendel-Dynamos	217
g) Generatoren für mittelbaren Antrieb durch Fahrzeuge	217
h) Schweißstromquellen	217
B. Gleichstrom-Motoren	219
a) Normal-Motoren offener und geschlossener Bauart	219
b) Turbomotoren	220
c) Walzwerksmotoren	220
d) Fördermotoren	226
 III. Asynchronmaschinen (Asynchrone Induktionsmotoren)	
A. Normalmotoren	228
B. Mittlere und große Kurzschlußläufermotoren	231
C. Schleifringläufermotoren	231
D. Spezial-Motoren	233
a) Vibrationsarme Motoren	233
b) Geräuscharme Motoren	233
c) Polumschaltbare Motoren	234
d) Motoren für intermittierenden Betrieb	234
e) Stopmotoren	234
f) Webstuhlmotoren	234
g) Getriebemotoren	234
h) Ventilationsmotoren	236

	Seite
i) Drückermotoren	236
k) Tauchpumpenmotoren	236
l) Rollgangmotoren	236
m) Explosionsgeschützte Motoren	236
n) Große Kurzschlußläufermotoren	238
IV. Wechselstrom-Kommutator-Maschinen	
A. Kleinstmotoren	238
B. Reihenschluß-Kommutator-Motoren	238
C. Drehstrom-Kommutator-Maschinen	239
a) Drehstrom-Kommutator-Motoren mit Nebenschlußcharakteristik	239
b) Drehstrom-Kommutator-Maschinen niedriger Frequenz	240
V. Bahnmotoren	
A. Gleichstrombahnmotoren	241
B. Mischstrommotoren	243
C. Wechselstrommotoren	246
D. Antriebe	248

Dritter Teil

Die Bauelemente elektrischer Maschinen

I. Das Blechpaket	
A. Allgemeines	257
B. Statorbleche für Wechselstrommaschinen	261
C. Rotorbleche für Wechselstrom- und Gleichstrom-Maschinen	269
D. Pol- und Polschuhbleche	272
a) Gleichstrom-, Haupt- und Wendepole	272
b) Pole und Polschuhe von Synchronmaschinen	274
II. Wicklungen und Wicklungsisolationen	
A. Allgemeines	278
B. Statorwicklungen von Wechselstrommaschinen	280
a) Geträufelte, gefädelt und eingeschobene (gelötete) Wicklungen für halb-offene Nuten	281
b) Eingelegte Wicklungen in offene Nuten	288
C. Rotorwicklungen	295
a) Asynchron-Kurzschlußläufer	295
1. Anlauferwärmung	296
2. Anlaufzeit	299
3. Nut- und Stabformen für Kurzschlußläufer	299
b) Asynchron-Schleifringläufer	302
c) Gleichstrom- und Wechselstromkommutator-Maschine	305
1. Allgemeines	305
2. Technische Ausführung der Wicklung	309
3. Isolierung der Gleichstromwicklungen	317
D. Pol- und Dämpferwicklungen für Synchronmaschinen	320
a) Maschinen mit ausgeprägten Polen (Schenkelpolmaschinen)	320
b) Turbogeneratoren	325
E. Feld- und Wendepolwicklungen für Gleichstrom-Maschinen einschließlich Kompensationswicklungen	327

III. Der feststehende Teil	
A. Gehäuse	331
a) Wechselstrommaschinen	331
b) Gleichstrommaschinen	339
c) Berechnung	341
1. Näherungsformeln	342
2. Genauere Berechnung	343
B. Haupt- und Wendepole von Gleichstrommaschinen	348
a) Hauptpole	348
b) Wendepole	350
C. Lagerschilde, Tragsterne, Verschaltungen	351
D. Bürsten, Bürstenhalter und Bürstenträger	356
a) Bürsten	356
b) Bürstenhalter	356
c) Bürstenträger	360
E. Klemmen	364
IV. Aufbau des umlaufenden Teiles	
A. Welle	366
B. Rotoren von Synchronmaschinen mit ausgeprägten Polen	367
a) Pole und Polbefestigung	367
b) Rotorkörper	369
C. Volltrommel-Rotoren für Turbogeneratoren	372
D. Rotoren von Asynchronmaschinen und Kommutatormaschinen	375
E. Berechnung von Bandagen	377
a) Stahldrahtbandagen	377
1. Allgemeines	377
2. Bandagieren mit einer Lage (Einlagenwicklung)	380
3. Bandagieren mit mehreren Lagen (Mehrlagenwicklung)	382
4. Beispiel	384
b) Kunstharz imprägnierte Glasfaserbandagen	387
F. Schleifringe	389
a) Schleifringe für Asynchronmaschinen	389
b) Schleifringe für Synchronmaschinen	392
G. Der Kommutator (Stromwender, Kollektor)	393
a) Allgemeines aus der Konstruktion	393
1. Der Gießharzkommutator	395
2. Der Gewölbedruckkommutator	395
3. Bauart ohne ausgeprägten Gewölbedruck mit zweiseitig aufliegenden Lamellen	395
4. Der Schrumpfringkommutator	396
b) Berechnung des Gewölbedruckkommutators	398
1. Bestimmung der Kräfte — Schrumpfdiagramm	399
2. Bestimmung der Formänderungen und Beanspruchungen	409
c) Schwalbenschwanzkommutator ohne ausgeprägten Gewölbedruck	412
1. Bauart mit innen aufliegenden Lamellen	412
2. Bauart mit keilförmiger Einspannung	412
d) Turbokommutator	412
V. Festigkeitsberechnung des umlaufenden Teiles	
A. Allgemeines über mechanische Beanspruchung und Sicherheit	413
a) Mechanische Spannungszustände	413

	Seite
b) Vergleichsspannung	415
1. Dreidimensionaler Spannungszustand	416
2. Zweidimensionaler Spannungszustand	416
3. Sicherheiten	417
4. Dauerfestigkeit, Zeitfestigkeit und Zeitstandfestigkeit	419
5. Kerbwirkung, Formzahl und Kerbwirkungszahl	421
B. Berechnung des Rotors der Synchronmaschine mit Einzelpolen	423
a) Die Pole und die Wicklung	423
b) Die Polbefestigung	425
1. Schrauben	425
2. Klauen und Keile	427
3. Kämme	436
C. Räder und Kränze	437
a) Speichenräder	437
1. Bezeichnungen	439
2. Beanspruchung im stationären Betrieb (konstante Winkelgeschwindigkeit)	440
3. Beanspruchungen im instationären Betrieb (Kurzschluß)	447
b) Scheibenräder	449
1. Bezeichnungen	449
2. Der Scheibenring oder die Kreisringscheibe konstanter Dicke mit gleichmäßig verteilter Belastung am Umfang	450
3. Das aus Einzelscheiben konstanter Dicke zusammengesetzte Scheibenrad mit gleichmäßig verteilter Belastung am Umfang	452
4. Der Scheibenring oder die Kreisringscheibe konstanter Dicke mit ungleichmäßig verteilter Belastung am Umfang	455
c) Berechnung der Rotor-Schichtkränze aus einzelnen Segmenten (Kettenbauart)	457
1. Bezeichnungen	457
2. Synchronmaschinen	458
3. Asynchron- und Gleichstrommaschinen	466
D. Turborotor	467
a) Die Rotorzähne und -keile	467
b) Der Rotorkörper	470
c) Festigkeitsberechnung der Wicklungskappe	472
1. Allgemeines und Bezeichnungen	472
2. Beanspruchung des Kappenringes im Stillstand	476
3. Einfluß der Erwärmung im Stillstand	479
4. Beanspruchung des Kappenringes im Betrieb	480
5. Einfluß der Erwärmung im Betrieb	483
6. Beanspruchung der Kappenplatte	485
7. Beanspruchung des Rotorkörpers durch die Kappe	486
8. Zusätzliche Beanspruchung der Kappe durch Abweichungen vom kreis-symmetrischen Belastungszustand	486
E. Die Welle im Normalbetrieb	488
a) Spannungsnachweis an Wellen	488
b) Wellenenden—Keile	491
c) Biegemomente querbelasteter Wellen	494
d) Verformungen der Welle—Biegelinien	499
e) Montage von Wellensträngen	506

	Seite
F. Die Welle bei instationären Zuständen	507
a) Allgemeines über instationäre Zustände, insbesondere über Schwingungen von Wellen	507
b) Torsionsschwingungen	509
1. Beispiel einer analytischen Berechnung von Torsionsschwingungen einer Welle	510
2. Das Verfahren von Holzer zur Ermittlung von Eigenkreisfrequenzen für Torsionsschwingungen bei mehreren Drehmassen	514
3. Beanspruchung einer Welle im Kurzschluß	517
c) Biegeschwingungen	523
1. Einleitung	523
2. Kritische Winkelgeschwindigkeit und Eigenkreisfrequenz einer masse- losen Welle auf starren, aber frei drehbaren Lagern mit Einzelmasse in der Mitte	524
3. Eigenfrequenzen der glatten Welle auf zwei Lagern	527
4. Eigenfrequenzen der abgesetzten Welle auf zwei Lagern. Energie- methode von Kull-Rayleigh	529
5. Eigenkreisfrequenzen der glatten Welle auf mehreren Lagern	531
6. Kritische Drehzahlen abgesetzter Wellen auf mehreren Lagern	531
7. Der Einfluß des magnetischen Zuges auf die biegekritische Drehzahl und den mechanischen Lauf elektrischer Maschinen	536
8. Verschiedene sekundäre Einflüsse und Störungen	538
d) Gütemaßstäbe für die Beurteilung von Maschinenschwingungen	544
G. Berechnung von Bandagen und Kommutatoren s. S. 302 bzw. S. 322	
VI. Ventilatoren	
A. Systeme, Kühlluftstrom, Druckbedarf	548
B. Theoretische Grundlagen	549
a) Ventilatorleistung	549
b) Druckerzeugung	549
c) Geschwindigkeitsdreiecke	550
d) Kennlinien und Kennzahlen	551
e) Auslegung der Ventilatoren	552
1. Radialventilatoren	552
2. Axialventilatoren	553
VII. Die Lagerung	
A. Allgemeines	558
a) Zusammenhang zwischen Antriebsart und Lagerkräften	559
b) Anforderungen an die Lagerung elektrischer Maschinen	559
c) Grundlagen für die Berechnung und Auslegung der Lager	561
B. Wälzlager	561
a) Lagerungsart	561
b) Schmierung und Abdichtung der Wälzlager	563
c) Lebensdauer und Anwendungsbereich der Wälzlager	566
C. Gleitlager	566
a) Gleitlager für horizontale Wellen	566
b) Gleitlager für vertikale Wellen	570
D. Lagerströme	574
VIII. Federnde Aufstellung elektrischer Maschinen	
a) Allgemeiner Fall	575

	Seite
b) Stationärer Lauf von Maschinen mit pulsierendem Drehmoment (Einphasenmaschinen)	578
c) Instationärer Lauf (einphasig-zweisträngiger Stoßkurzschluß)	580
d) Unerwünschte Freiheitsgrade	585
e) Ausführungsarten	586
IX. Anhang I—VII	
Anhang I: Berechnung eines Ringes	588
a) Der dünne Ring	588
1. Gleichmäßige Belastung über den Umfang	588
2. Einzellasten	589
b) Der dicke Ring	589
Anhang II: Berechnung loser und fester Flansche—Umstülpung eines Kreisringes durch ein äußeres Moment	589
a) Loser Flansch (Ring)	589
b) Fester Flansch	590
Anhang III: Beanspruchung und Verformung eines Radkranzes unter dem Einfluß von Armkräften	591
Anhang IV: Beanspruchung eines Rad-Armes durch ein äußeres Drehmoment ...	592
Anhang V: Einige Einflußzahlen für die biegesteife Kreiszyinderschale mit rotationssymmetrischer Belastung	594
Anhang VI: Radiale Dehnung am äußeren freien Ende eines rotierenden Radarmes	596
Anhang VII: Beziehungen zwischen Größen, welche den zeitlichen Verlauf harmonischer Schwingungen beschreiben	597
Literaturverzeichnis	599
Sachverzeichnis	601
Verzeichnis der Tabellen	606
Quellenangabe der Abbildungen	608