

WICKLUNGEN  
ELEKTRISCHER MASCHINEN  
UND IHRE HERSTELLUNG

VON

DR.-ING. HABIL. F. HEILES

ZWEITE VERBESSERTE AUFLAGE

MIT 257 ABBILDUNGEN



SPRINGER-VERLAG BERLIN HEIDELBERG GMBH 1953

ISBN 978-3-662-13434-4

ISBN 978-3-662-13433-7 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-13433-7

ALLE RECHTE, INSBESONDERE DAS DER ÜBERSETZUNG  
IN FREMDE SPRACHEN, VORBEHALTEN  
COPYRIGHT 1936 AND 1953 BY SPRINGER-VERLAG BERLIN HEIDELBERG  
URSPRÜNGLICH ERSCHIENEN BEI SPRINGER-VERLAG,  
BERLIN / GÖTTINGEN / HEIDELBERG 1953

## Vorwort.

Die erste Auflage des Buches war 1942 vergriffen. Das Manuskript für eine neue Auflage wurde trotz kriegsbedingter Schwierigkeiten im Jahre 1943 fertiggestellt; mit der Drucklegung konnte jedoch während des Krieges nicht mehr begonnen werden. Nach meiner Rückkehr aus der Kriegsgefangenschaft Ende 1949 war es notwendig, das Manuskript noch einmal durchzuarbeiten und den Anforderungen anzupassen, die man heute an ein kurzes, einführendes Buch über die Wicklungen elektrischer Maschinen stellen muß.

Bei der ersten Auflage lag der Schwerpunkt der Darstellung auf der praktischen Herstellung der Wicklungen, ihrer Isolierung, Befestigung und Prüfung sowie auf der Beschreibung der dabei verwendeten Einrichtungen und Werkstoffe. Der Entwurf der Wicklungen war demgegenüber zu kurz gekommen. In der neuen Auflage ist versucht worden, diesen Nachteil zu beseitigen; dabei war eine Erweiterung und Umgruppierung des Stoffes notwendig. Da außerdem ein umfangreiches Schrifttumsverzeichnis in das Buch aufgenommen worden ist, ließ sich eine Vergrößerung seines Umfanges nicht vermeiden.

Es kann jedoch nicht die Aufgabe des Buches sein, über alle gebräuchlichen und bekannt gewordenen Entwurfsverfahren zu berichten. Den Vorteil der Anschaulichkeit haben die geometrischen Hilfsmittel für den Wicklungsentwurf (Nutenstern, Spannungstern, Spannungsvieleck), für den praktischen Gebrauch ist aber ihre Anwendung in den meisten Fällen zu zeitraubend und umständlich. An ihrer Stelle sind im Buch einfache Zahlentafeln (Entwurfspläne) verwendet, deren innerer Zusammenhang mit den geometrischen Hilfsmitteln deutlich erkennbar ist. Dem Leser, der diese Zusammenhänge verstanden hat, wird auch die Benutzung anderer Entwurfsverfahren keine Schwierigkeiten bereiten, die fast alle mehr oder weniger auf der gleichen Grundlage beruhen. Aus diesem Rahmen fällt das von DE PISTOYE angegebene Verfahren heraus, Bruchlochwicklungen aus Ganzlochwicklungen abzuleiten; ihm ist daher ein besonderer, kurzer Abschnitt gewidmet.

Die Wicklungsfaktoren und ihre Berechnung werden zunächst in allgemeiner Form betrachtet unter Beschränkung auf die Grundwelle und die Oberwellen *ungerader* Ordnungszahl. Bei den einzel-

nen Wicklungsarten ist dann die Anwendung der allgemeinen Berechnungsformeln gezeigt. Am Schluß des Buches befinden sich Zahlen- und Kurventafeln, welche für die gebräuchlichsten Wicklungen die Bestimmung der Wicklungsfaktoren erleichtern.

Ein Wort ist noch über die Art der Darstellung der Stromverdrängungserscheinungen in Nutenleitern zu sagen. Die Theorie dieser Erscheinungen ist in mehreren anderen Büchern gut und ausführlich behandelt. Für den Berechnungsingenieur ist es jedoch wichtig, ein Hilfsmittel zur Verfügung zu haben, mit dem er sich rein handwerksmäßig über die ungefähre Größe der Zusatzverluste durch Stromverdrängung für eine bestimmte Leiteranordnung unterrichten kann. Diesem Zweck soll die im Buch gewählte Darstellungsart dienen.

Ich hoffe, daß das Buch in seiner jetzigen Gestalt nicht nur den mit der praktischen Herstellung der Wicklungen beschäftigten Elektrotechnikern ein brauchbares Hilfsmittel ist, sondern auch dem Berechnungs- und Konstruktionsingenieur nützliche Dienste leistet. Die Form der Darstellung und der Umfang des Stoffes läßt es auch für den Gebrauch an Technischen Hochschulen und Ingenieurschulen geeignet erscheinen.

Die Herren Dipl.-Ing. KARL LANGGUTH und Dipl.-Ing. KARL MEERBECK haben mit großer Aufmerksamkeit und Gewissenhaftigkeit die Korrekturen mitgelesen. Auch meine Tochter hat mich beim Lesen der Korrekturen sowie beim Zusammenstellen des Schrifttumsverzeichnisses<sup>1</sup> tatkräftig unterstützt. Ihnen sei auch an dieser Stelle für die wertvolle Hilfe gedankt, die sie mir geleistet haben. Den in den Abbildungsunterschriften und im Text genannten Firmen danke ich für die Überlassung von Bildern und sonstigen Unterlagen. Schließlich gilt mein Dank auch dem Springer-Verlag für die vorzügliche Ausstattung des Buches.

Aachen, September 1952.

**F. Heiles.**

---

<sup>1</sup> Hinweise auf das Schrifttumsverzeichnis im Text und in Abbildungsunterschriften enthalten in eckigen Klammern kursiv gedruckt die Nummern, unter denen die betreffenden Arbeiten im Verzeichnis aufgeführt sind.

# Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung:	
Die elektrischen Maschinen.	
A. Allgemeines . . . . .	1
B. Die Synchronmaschine . . . . .	7
C. Die Asynchronmaschine (Induktionsmaschine) . . . . .	11
D. Die Gleichstrommaschine . . . . .	12
E. Der Einankerumformer . . . . .	16
F. Die Wechselstrom-Stromwendermaschinen . . . . .	16
Erster Teil:	
Wechselstromwicklungen.	
I. Grundsätzlicher Aufbau der Wicklungen . . . . .	19
A. Allgemeines . . . . .	19
B. Einschichtwicklungen . . . . .	20
C. Zweischichtwicklungen . . . . .	23
1. Durchmesserwicklungen . . . . .	23
2. Gesehnte Wicklungen . . . . .	24
3. Wicklungen mit Zonenänderung . . . . .	24
II. Wicklungen und Spannungserzeugung . . . . .	25
A. Allgemeines . . . . .	25
B. Nutenstern und Spannungstern . . . . .	27
C. Wicklungsfaktoren. . . . .	29
1. Wicklungsfaktor der Grundwelle . . . . .	29
2. Wicklungsfaktoren der Oberwellen . . . . .	33
D. Hilfsmittel beim Entwurf von Wechselstromwicklungen . . . . .	34
1. Einschichtwicklungen . . . . .	35
2. Zweischichtwicklungen . . . . .	36
III. Wechselstrom-Ständerwicklungen. . . . .	36
A. Dreiphasige Ständerwicklungen mit ganzer Nutenzahl je Pol und Strang (Ganzlochwicklungen) . . . . .	37
1. Einschichtige Spulenwicklungen . . . . .	37
2. Zweischichtige Spulenwicklungen . . . . .	43
3. Stabwicklungen. . . . .	50
4. Wicklungsfaktoren der dreiphasigen Ganzlochwicklungen . . . . .	58
5. Schaltung der Spulen und Stränge. . . . .	59
B. Dreiphasige Ständerwicklungen mit gebrochener Nutenzahl je Pol und Strang (Bruchlochwicklungen) . . . . .	63
1. Einschichtwicklungen (alle Nuten bewickelt) . . . . .	64
2. Zweischichtwicklungen (alle Nuten bewickelt) . . . . .	70
3. Wicklungsfaktoren der Bruchlochwicklungen (alle Nuten bewickelt) . . . . .	75

	Seite
4. Schaltung der Spulen (Möglichkeiten der Parallelschaltung)	78
5. Aus Ganzlochwicklungen abgeleitete Bruchlochwicklungen	79
6. Wicklungen mit freien Nuten	80
C. Wicklungen für Polumschaltung	83
1. Allgemeines	83
2. DAHLANDER-Schaltung	83
3. Schaltung der Wicklungsteile und Stränge	87
D. Zweiphasige Ständerwicklungen	89
E. Einphasige Ständerwicklungen	92
F. Zusätzliche Stromwärmeverluste	96
1. Zusätzliche Verluste in Wechselstromwicklungen	96
2. Maßnahmen zur Herabsetzung der zusätzlichen Stromwärmeverluste	98
3. Berechnung des Verlustverhältnisses	101
4. Zusätzliche Verluste in Gleichstrom-Ankerwicklungen	105
5. Zusätzliche Verluste in Nutenleitern durch das Hauptfeld	106
G. Herstellung der Wechselstrom-Ständerwicklungen	106
1. Drahtwicklungen	106
2. Stabwicklungen	118
IV. Mehrphasige Läuferwicklungen	121
A. Drahtwicklungen	121
B. Stabwicklungen	122
C. Käfigwicklungen	124

## Zweiter Teil:

## Stromwenderwicklungen.

V. Wicklungen für Gleichstrom- und Wechselstrom-Stromwendermaschinen	126
A. Allgemeines	126
B. Anordnung der Spulenseiten in der Nut	127
C. Schaltung der Spulen, Wicklungsarten	128
1. Schleifenwicklung	129
2. Wellenwicklung	131
D. Nutenstern, Spannungstern, Spannungsvielecke	132
E. Darstellung und Entwurf der Wicklungen	135
1. Eingängige Schleifenwicklung (Parallelwicklung)	135
2. Eingängige Wellenwicklung (Reihenwicklung)	140
3. Zweigängige Schleifenwicklung	144
4. Zwei- und mehrgängige Wellenwicklung (Reihenparallelwicklung)	147
F. Grundsätzliches über die Wahl der Wicklung	149
G. Symmetriebedingungen und Ausführbarkeit der Wicklungen	150
H. Ausgleichsverbindungen	153
1. Ausgleichsverbindungen erster Art	153
2. Ausgleichsverbindungen zweiter Art	155
3. Ausgleichsverbindungen bei der zweigängigen Schleifenwicklung	158
J. Wicklungen mit Selbstausgleich	160
K. Wellenwicklungen mit blinden Spulen und künstlich geschlossene Wellenwicklungen	162
1. Wellenwicklungen mit blinden Spulen	162
2. Künstlich geschlossene Wellenwicklungen	164

	Seite
L. Herstellung von Stromwenderwicklungen . . . . .	165
1. Drahtwicklungen . . . . .	166
2. Stabwicklungen. . . . .	172
3. Verbindung der Wicklung mit dem Stromwender . . . . .	175
4. Herstellung der Ausgleichsverbindungen. . . . .	178
5. Wicklungen für kleine Anker . . . . .	179
VI. Angezapfte und aufgeschnittene Gleichstrom-Ankerwicklungen . . . . .	188
A. Angezapfte Gleichstrom-Ankerwicklungen . . . . .	188
B. Aufgeschnittene Gleichstrom-Ankerwicklungen . . . . .	191
1. Grundsätzliche Betrachtungen . . . . .	191
2. Aufgeschnittene Gleichstrom-Ankerwicklungen als Wechselstrom- Stabwicklungen. . . . .	192
Dritter Teil: Sonstige Wicklungen.	
VII. Gleichstrom-Feldwicklungen . . . . .	198
A. Feldwicklungen für Gleichstrommaschinen und Einankerumformer	198
B. Feldwicklungen für Schenkelpol-Synchronmaschinen . . . . .	201
C. Feldwicklungen für Turbomaschinen . . . . .	204
VIII. Hilfswicklungen . . . . .	205
A. Wendepolwicklungen. . . . .	205
B. Kompensationswicklungen . . . . .	207
C. Käfigwicklungen als Dämpfer- und Anlaufwicklungen . . . . .	208
Vierter Teil: Isolieren, Befestigen und Prüfen der Wicklungen.	
IX. Isolieren der Wicklungen . . . . .	210
A. Isolierstoffe . . . . .	210
1. Allgemeines . . . . .	210
2. Glimmer und Glimmererzeugnisse . . . . .	213
3. Asbest . . . . .	215
4. Glasfasererzeugnisse. . . . .	215
5. Zellstofferzeugnisse . . . . .	215
6. Faserstofferzeugnisse . . . . .	216
7. Isolier-Schichtstoffe . . . . .	217
8. Isolierlacke. . . . .	217
9. Füllmassen (Kompondmassen) . . . . .	218
B. Isolation der Drähte und Stäbe . . . . .	218
C. Isolation von Feldspulen . . . . .	222
D. Isolation von Nutenwicklungen . . . . .	223
1. Wechselstrom-Ständerwicklungen. . . . .	223
2. Läuferwicklungen von Asynchronmaschinen . . . . .	230
3. Stromwenderwicklungen . . . . .	230
E. Herstellung von Spulen mit Füllmasse (kompondierten Spulen)	232
F. Glimmschutzmaßnahmen . . . . .	234
G. Trocknen und Lackieren der Wicklungen . . . . .	235
X. Sichern der Wicklungen gegen mechanische Kräfte . . . . .	236
A. Sichern gegen Kurzschlußkräfte . . . . .	236
B. Sichern gegen Fliehkräfte . . . . .	238

	Seite
XI. Prüfen der Wicklungen . . . . .	240
A. Prüfung der fertigen neuen Wicklungen . . . . .	240
1. Wicklungsprüfung . . . . .	240
2. Windungsprüfung . . . . .	242
3. Klemmenprüfung . . . . .	242
B. Prüfung teilweise erneuerter Wicklungen . . . . .	242
C. Prüfung während der Herstellung der Wicklungen . . . . .	243
1. Prüfung von Stromwendern und Schleifringen . . . . .	243
2. Prüfung von Spulen und Wicklungen . . . . .	243
3. Aufsuchen von Fehlerstellen . . . . .	247
Anhang:	
Umschalten und Umwickeln.	
A. Wechselstromwicklungen . . . . .	248
1. Änderung der Spannung bei gleichbleibender Polzahl und Frequenz . . . . .	248
2. Änderung der Frequenz bei gleichbleibender Polzahl . . . . .	250
3. Änderung der Polzahl bei gleichbleibender Spannung und Fre- quenz . . . . .	251
4. Änderung der Wicklungsart . . . . .	251
B. Gleichstromwicklungen . . . . .	251
1. Änderung der Spannung bei gleichbleibender Drehzahl . . . . .	252
2. Änderung der Drehzahl bei gleichbleibender Spannung . . . . .	254
Übersicht über die Wicklungsfaktoren . . . . .	255
Schrifttumsverzeichnis . . . . .	259
Sachverzeichnis . . . . .	266



## Bedeutung der verwendeten Formelzeichen.

- $a$  = Zahl der parallelen Ankerzweigpaare.  
 $A$  = Faktor zur Berechnung des Verlustverhältnisses.  
 $b$  = Breite;  $b_K$  gesamte Kupferbreite in der Nut;  $b_N$  Nutbreite.  
 $B$  = Faktor zur Berechnung des Verlustverhältnisses.  
 $B$  = Dichte des magnetischen Feldes (Induktion);  $B_m$  Scheitelwert.  
 $d, D$  = Durchmesser;  $d_r$  des Rollkreises.  
 $e, E$  = erzeugte Spannung (EMK);  $E_t$  Teilspannung.  
 $f$  = Frequenz.  
 $F$  = Querschnittsfläche.  
 $g$  = Gangzahl.  
 $g$  = ganze Zahl.  
 $h$  = Leiterhöhe;  $h_K$  gesamte Kupferhöhe;  $h_{krit}$  kritische Leiterhöhe;  $h_t$  Höhe eines Teilleiters.  
 $k$  = Zahl der Stromwenderstege.  
 $l$  = wirksame Ankerlänge.  
 $m$  = Strangzahl.  
 $m$  = Lagenzahl in der Nut.  
 $n$  = Drehzahl;  $n_s$  synchrone Drehzahl.  
 $n$  = Zahl der Teilleiter je Einzelleiter.  
 $n$  = Zahl der Stromableitungen bei angezapften und aufgeschnittenen Wicklungen.  
 $n$  = Zahl der zusammensetzenden Teilspannungen.  
 $N$  = Nutenzahl.  
 $p$  = Polpaarzahl;  $p'$  und  $p''$  bei Polumschaltung.  
 $q$  = Zahl der bewickelten Nuten je Pol und Strang.  
 $Q$  = Zahl der Nuten je Pol und Strang (wenn nicht alle bewickelt sind).  
 $r$  = Zahl der Wicklungsringe.  
 $s$  = Schlupf.  
 $t$  = größter gemeinsamer Teiler der Nuten- und Polpaarzahl.  
 $t'$  = Zahl der in einer Wicklung enthaltenen Urwicklungen.  
 $u$  = Zahl der Spulenseiten quer zur Nut.  
 $v$  = Verlustverhältnis;  $v'$  für Zusatzverluste erster,  $v''$  für Zusatzverluste zweiter Ordnung.  
 $w$  = Windungszahl.  
 $W$  = Spulenweite.  
 $y$  = gesamter Wicklungsschritt;  $y_1$  erster Teilschritt (Spulenweite);  $y_2$  zweiter Teilschritt (Schaltschritt);  $y_s$  = Verbindungsschritt.  
 $z$  = Leiterzahl;  $z_1$  und  $z_2$  Zahl der Spulen in den Zonenwinkeln  $\beta_1$  und  $\beta_2$ .  
 $Z$  = Zahl der Spulenköpfe je Ebenenpaar bei Evolventenverbindungen.  
 $\alpha$  = elektrischer Winkel zwischen benachbarten Nuten.  
 $\alpha'$  = Winkel zwischen benachbarten Strahlen im Spannungsstern.  
 $\alpha, \alpha'$  = Faktoren zur Berechnung der reduzierten Leiterhöhe.  
 $\beta$  = Zonenwinkel;  $\beta_1$  und  $\beta_2$  bei Zonenänderung.  
 $\beta$  = Faktor zur Berechnung des Verlustverhältnisses.

- $\gamma$  = Zahl der Spulen je Strang.  
 $\gamma$  = Faktor zur Berechnung des Verlustverhältnisses.  
 $\delta$  = Mittellinienabstand bei Evolventenverbindungen;  $\delta_1$  und  $\delta_2$  bei vergrößertem Abstand zwischen den Strängen.  
 $\varepsilon$  = Winkel, Wicklungsfaktoren (Teilfaktoren) bestimmend;  $\varepsilon_s$  Sehnungswinkel;  $\varepsilon_U$  Unterschiedswinkel;  $\varepsilon_V$  Verschiebungswinkel.  
 $\eta_1$  = Nutenschritt.  
 $\kappa$  = elektrische Leitfähigkeit.  
 $\lambda$  = Verhältnis der Eisenlänge zur mittleren Leiterlänge.  
 $\nu$  = Ordnungszahl der Einzelwellen.  
 $\xi$  = Wicklungsfaktor;  $\xi_\nu$  der  $\nu$ -ten Welle;  $\xi_{s\nu}$  Sehnungsfaktor,  $\xi_{U\nu}$  Unterschiedsfaktor,  $\xi_{V\nu}$  Verschiebungsfaktor,  $\xi_{z\nu}$  Zonenfaktor der  $\nu$ -ten Welle.  
 $\xi, \xi'$  = reduzierte Leiterhöhe.  
 $\tau$  = Polteilung.  
 $\Phi$  = magnetischer Fluß.