

Inhaltsverzeichnis

	Seite
I. Geschichtliche Entwicklung der Induktionsmaschine	1
II. Mechanische Ausführung der Induktionsmaschine	2
1. Grundsätzlicher Aufbau	2
2. Ausführungsformen, Schutzarten	6
3. Angaben über die elektrische Ausführung nach den DIN-VDE-Normblättern	10
4. Leistungsschild und Klemmenbezeichnungen	14
III. Wicklungen	15
1. Ständerwicklungen	15
2. Isolierung	18
a) Die Leiter	18
b) Die Wicklungen	20
3. Getrennte Wicklungen für polumschaltbare Motoren	21
4. Polumschaltbare Wicklungen	27
5. Läuferwicklungen	29
IV. Der Magnetisierungsstrom	30
1. Magnetisierungscharakteristiken der Maschine	30
a) Der Luftspalt	31
b) Zähne	34
c) Joch	35
a) Der Feldverlauf in einem ringförmigen Blechschnitt ohne Rücksicht auf den Wellenfluß 35. — β) Die Entlastung des Joches durch den durch die Welle gehenden Fluß (Wellenfluß) 38.	
2. Berechnung des Magnetisierungsstromes	41
a) Zeitlicher Verlauf des Stromes	41
a) Einphasenwicklung 41. — β) Mehrphasenwicklung 43.	
b) Praktisches Verfahren zur Bestimmung des Effektivwertes des Magnetisierungsstromes	45
V. Wirkwiderstände der Wicklungen	48
1. Gewöhnliche Wicklungen	48
2. Käfigwicklungen	49
3. Kurzschlußwicklung mit zwei Stäben im Strang	50
VI. Streureaktanzen	50
1. Allgemeines	50
2. Nutstreuung	51
3. Stirnstreuung	61
4. Oberwellen- oder Spaltstreuung	64
5. Streuung durch die Nutschrägung	66
6. Läuferreaktanzen und ihre auf die Ständerwicklung bezogenen Werte	66
7. Der Einfluß der Eisensättigung	67
VII. Die Entstehung des magnetischen Feldes	69
1. Die Feldkurve einer Spule	69

	Seite
2. Die Feldkurve einer Spulengruppe	72
3. Die Feldkurve eines Stranges	74
4. Das Luftspaltfeld	76
a) Das Wechselfeld	76
b) Das Drehfeld	77
c) Das elliptische Drehfeld	81
VIII. Betriebseigenschaften des mehrphasigen Induktionsmotors	84
1. Ortskurven	84
2. Magnetisch verkettete Kreise	87
3. Wirkungsweise des Motors	90
4. Spannungsdiagramm und Ersatzschaltung	92
5. Das genaue Kreisdiagramm	94
6. Die vereinfachte Ersatzschaltung und das vereinfachte Kreisdiagramm	98
7. Die wichtigsten Größen in analytischer Behandlung	101
8. Die Eisenverluste und das Verhalten des Motors in der Nähe der synchronen Drehzahl	106
9. Abweichungen des Kreisdiagramms von der Wirklichkeit	108
IX. Wirkung der Oberwellen	109
1. Die fiktiven Einzelwellen	109
a) Ständerwicklung	109
b) Läuferwicklung	110
c) Ersatzschaltung	112
2. Spaltstreuung	115
a) Gewöhnliche Wicklungen	115
b) Berücksichtigung der Schrägung der Nuten	118
c) Käfigwicklung	118
d) Einphasenwicklung	119
e) Verschiedene Besonderheiten bei der Berechnung der Spaltstreuung	121
3. Zusatzdrehmomente durch die Oberwellen	123
a) Die asynchronen Momente	123
b) Die synchronen Momente	126
4. Geräuschbildung	131
a) Radiale Kräfte	131
b) Geräuscherscheinungen	137
5. Zusatzverluste	140
a) Praktische Beobachtungen	140
b) Querströme und ihre Wirkung	143
6. Wahl der Nutenzahl	146
X. Stromverdrängung	147
1. Allgemeines	147
2. Nuten mit parallelen Flanken und rechteckigen Leitern	148
3. Ständerwicklung	150
4. Die unterteilten, aber nicht verschränkten Stäbe	152
5. Leiter im freien Luftraum	153
6. Kreisförmige Stäbe	153
7. Der Hochstab und seine Abarten	154
8. Der Doppelkäfig und seine Abarten	160
9. Die nicht vom Hauptstrom durchflossenen Stromverdrängungsstäbe	164
XI. Die Stromverdrängungsmotoren	166
1. Allgemeines	166
2. Der Hochstabläufer	168
3. Der Doppelkäfigläufer	171
XII. Stationäre Erwärmung	179
1. Äußere Wärmeleitung	179
a) Geschlossene Maschinen ohne besondere Außenkühlung	179

b) Ventilierte Maschinen	180
c) Der Kühler	182
d) Außenbelüftete Motoren mit Rippen	185
2. Innere Wärmeleitung	188
a) Temperaturverteilung im Spulenquerschnitt	188
b) Temperaturverteilung längs der Spule	189
c) Vorausberechnung der Erwärmung	192
3. Erwärmung und Lebensdauer der Wicklung	193
4. Erwärmungs- und Abkühlungskurven	194
a) Erwärmung eines Körpers	194
b) Erwärmung einer Maschine	195
c) Erwärmungsprobe und ihre Abkürzung	197
5. Verluste und Erwärmung der Ständerwicklung beim unsymmetrischen Stromsystem (Netz)	201

XIII. Erwärmung des Motors während der Übergangsvorgänge 202

1. Anlaufzeit	203
2. Übergangsvorgänge des leerlaufenden Kurzschlußmotors	204
a) Übergangszeit des Motors ohne Stromverdrängung	204
b) Wärmeverlust in Wicklungen des Kurzschlußmotors ohne Stromverdrängung	205
c) Wärmeverlust in Wicklungen des Doppelkäfigmotors	206
d) Wärmeverlust in der Ständerwicklung des Motors mit Hochstabläufer	208
e) Läuferwärme des polumschaltbaren Motors (mit oder ohne Stromverdrängung)	208
f) Schalthäufigkeit	210
3. Erwärmung der Wicklungen bei Übergangsvorgängen	211
a) Erwärmung der Ständerwicklung und der Läuferwicklung ohne Wärmeabgabe	211
b) Erwärmung eines Stabes bei konstanter Verlustwärme (gebremster Motor)	213
c) Anlaufwärme und Anlaufleistung	214
d) Erwärmung beim Anlauf	217
e) Erwärmung beim Bremsen mit Gegenstrom	218
f) Erwärmung beim Umkehren	219
4. Temperaturverteilung im Hochstab beim Anlauf	220
a) Differentialgleichung der Erwärmung	220
b) Temperaturdifferenz zwischen oberer und unterer Kante des Stabes bei gebremstem Motor	221
c) Temperaturdifferenz zwischen oberem und unterem Stabrand des anlaufenden Motors	223
d) Schätzung der Temperaturdifferenz	225
e) Zahlenbeispiel	226
f) Vergleich der verschiedenen Käfigwicklungen	227

XIV. Elektrische Ausgleichsvorgänge 227

1. Freie Strombeläge in Mehrphasenmaschinen	227
2. Durch die Ausgleichsströme hervorgerufene Drehmomente	231
3. Einschalten des Motors	231
a) Stromstöße	231
b) Drehmomentstöße	234
c) Überschwingungen über die synchrone Drehzahl	237
4. Das Ausschalten von Induktionsmotoren	240
5. Kurzschluß des Induktionsmotors	241
6. Stern-Dreieck-Umschalten	244

XV. Mechanische Kräfte im Motor 252

1. Axiale Kräfte	252
a) Kräfte bei unsymmetrischer Läuferlage bei Läufem ohne Ventilationskanäle	253
b) Kräfte durch Ventilationskanäle	255

	Seite
c) Kräfte beim konischen Läufer	256
d) Kräfte infolge der Schrägstellung der Nuten	257
2. Radiale Kräfte	257
a) Magnetischer Zug infolge der exzentrischen Lage des Läufers bei mehrpolgigen Maschinen ($p \geq 2$)	258
b) Magnetischer Zug bei zweipolgigen Maschinen	259
c) Einfluß der Sättigung	260
d) Berechnung der radialen Kraft unter Berücksichtigung der prak- tischen Verhältnisse	262
3. Stromkräfte an dem in der Nut eingebetteten Leiter	263
4. Stromkräfte an den Wicklungsköpfen	264
a) Allgemeines	264
b) Kräfte auf die einzelnen Spulenseiten	267
c) Kräfte zwischen den Spulengruppen	268
d) Resultierende Kräfte an der Wicklungsabstützung	269
XVI. Anlauf	271
1. Kurzschlußmotor	271
a) Vorgänge beim Anlauf	271
b) Rückwirkung auf das Netz	272
c) Anlaßverfahren mit konstantem Verhältnis zwischen dem Anzugs- strom und dem Anzugsmoment	275
a) Anlaßtransformator 275. — β) Stern-Dreieck-Anlassen 276. — γ) Anlassen mit Umschalten der Ständerwicklung 277.	
d) Anlaßverfahren mit veränderlichem Verhältnis zwischen Anzugs- strom und Anzugsmoment	279
e) Verschiedene andere Anlaßverfahren	282
a) Doppelständermotor 282. — β) Anlassen mit Anwurfmotor 283. γ) Fliehkraftkupplungen 284. — δ) Teilwicklungsanlauf 284.	
f) Anlauf mit Rücksicht auf die Arbeitsmaschine	284
g) Anlauf mit Rücksicht auf den Motor	290
h) Motorschutz	291
i) Ausführungsmöglichkeiten des Kurzschlußmotors für direktes Einschalten	291
2. Anlassen des Schleifringmotors	294
a) Allgemeines	294
b) Symmetrischer Anlasser	296
c) Unsymmetrischer Anlasser	297
d) Wahl des Anlassers	298
e) Anlassen mit Umschaltung im Läuferkreis	299
XVII. Drehzahlsteuerung von Drehstrominduktionsmotoren	300
1. Widerstandssteuerung	301
a) Steuerung bei konstantem Belastungsmoment	301
b) Steuerung bei quadratisch abnehmendem Belastungsmoment	302
c) Steuerung bei konstanter Leistung	303
2. Steuerung durch primäre Spannungsänderung	303
3. Steuerung durch Polumschaltung	304
4. Mehrfachläufermotoren (mechanische Kaskade)	307
5. Steuerung durch Doppelmotorschaltung	308
6. Steuerung durch Änderung der Netzfrequenz	309
a) Allgemeines	309
b) Speisung durch Synchrongeneratoren	311
c) Speisung durch asynchrone Frequenzumformer	313
7. Kaskadenschaltungen	314
a) Kaskadenschaltung zweier Induktionsmaschinen	314
b) Steuersätze	318
XVIII. Unregelmäßigkeiten	319
1. Im Ständerkreis	319
a) Spannungen höherer Frequenz im Netz	319
b) Spannungsunsymmetrie	320
c) Ungleiche Windungszahl der Ständerwicklung	321

d) Unsymmetrische Schaltungen der Ständerwicklung	323
a) Allgemeines 323. — β) Kusa-Schaltungen 325. — γ) Brems-	
schaltungen 329.	
2. Im Läuferkreis	333
a) Unsymmetrischer Anlasser	333
b) Unvollkommener Käfig	334
c) Die einachsige Läuferwicklung (Görgessches Phänomen)	339
d) Brüche im Kurzschlußkäfig	340
XIX. Der Einphasenmotor	344
1. Aufbau und Anwendung	344
2. Der Einphasenmotor ohne Hilfswicklung	345
a) Ersatzschaltung und Ströme	345
b) Das Drehmoment	349
c) Drehstrommotor im Einphasenbetrieb	352
d) Stromwärmeverluste in der Läuferwicklung	354
e) Drehzahlsteuerung	355
3. Der Einphasenmotor mit abschaltbarer Hilfsphase und Vergleich der	
verschiedenen Anlaufverfahren	355
4. Der Kondensatormotor	359
a) Mit abschaltbarer Hilfswicklung	359
b) Mit dauernd eingeschalteter Hilfswicklung	360
c) Verhalten des Motors beim Anlauf	362
d) Der Leerlauf und das Anzugsmoment	365
5. Der Einphasenspaltmotor	368
a) Aufbau und Wirkungsweise	368
b) Spannungsgleichungen und ihre Lösung	369
c) Anzugsstrom und Anzugsmoment	370
d) Verhalten des Motors während des Anlaufens	373
e) Leerlauf des Motors	375
XX. Sonderanwendungen der Induktionsmaschine	377
1. Der Drehregler	377
a) Der einphasige Drehregler	377
b) Der mehrphasige Drehregler	378
2. Das Bremsen	382
a) Bremsen mit Gegenstrom und übersynchrones Bremsen	382
b) Bremsen durch Gleichstromerregung	383
c) Unsymmetrische Bremsschaltungen	385
d) Doppelmotorschaltung	385
3. Induktionsmaschine als Generator	386
a) Fremderregter Generator	386
b) Selbsterregter Generator	387
4. Frequenzumformer	389
5. Phasenumformer	392
6. Induktionsmotor mit Zwischenläufer	394
7. Der synchronisierte Induktionsmotor	394
8. Kompensierte Induktionsmotoren	395
9. Doppeltgespeiste Induktionsmaschine	395
a) Steuerbare Drossel	395
b) Motor bzw. Generator	396
10. Gleichlaufschaltungen	396
a) Induktionsmaschinen im Gleichlauf ohne Ausgleichsmaschinen	396
b) Die Induktionsmaschinen als Ausgleichsmaschinen	400
XXI. Verluste, Wirkungsgrad und Leistungsfaktor	402
1. Leerlaufverluste	403
a) Mechanische Verluste	403
b) Eisenverluste	404
2. Lastverluste	406
3. Wirkungsgrad	407
4. Blindleistungsverbrauch und Leistungsfaktor	409

	Seite
XXII. Experimentelle Untersuchungen	411
1. Bestimmung der Verluste und des Wirkungsgrades	411
a) Verluste	411
α) Wicklungsverluste 411. — β) Schlupfmessung 412. — γ) Leerlaufverluste 413. — δ) Kurzschlußversuch 414.	
b) Wirkungsgrad	415
2. Belastungsprobe	416
3. Strom- und Drehmomentkurve	419
4. Isolationsprobe	421
5. Messung der Zusatzverluste	422
6. Messung des Schwungmomentes	424
7. Praktische Prüfung der Motoren	424
XXIII. Entwurf von Induktionsmaschinen	425
1. Hauptabmessungen und Materialausnützung	425
a) Hauptabmessungen	425
α) Bohrungsdurchmesser 425. — β) Eisenlänge 427. — γ) Luftspalt 428. — δ) Außendurchmesser 428. — ϵ) Bestimmung der Leistung für eine gegebene Reihe 429. — ζ) Entwurf einer neuen Maschinenreihe 430.	
b) Die Maschinenreihe und ihre Eigenschaften	432
c) Drehschub sowie magnetische und elektrische Beanspruchungen im Luftspalt	435
2. Bedeutung einiger elektrischer und magnetischer Größen	437
a) Das Produkt Strombelag mal Stromdichte	437
b) Das Verhältnis der Luftspaltinduktion zum Strombelag	438
c) Der wirksame Nutraum einer Maschine	439
3. Richtlinien zum Ständer- und Läuferaufbau	439
a) Eisenblech	439
b) Nuten	440
c) Wicklungen	441
d) Schleifringe	442
e) Lüftung	442
f) Reaktanzen und Widerstände	443
g) Verluste	447
h) Leistungsfaktor	447
i) Übrige Daten des Motors	447
k) Berechnungsgang	449
4. Festigkeitsfragen bei Induktionsmaschinen	449
5. Polumschaltbare Motoren	452
a) Maschinengröße	452
α) Getrennte Wicklungen 452. — β) Umschaltbare Wicklungen 453.	
b) Berechnung der polumschaltbaren Motoren	454
6. Maschinengröße des Frequenzumformers	458
7. Berechnung des Einphasenmotors	459
XXIV. Berechnungsbeispiele	462
1. Nachrechnung eines Doppelkäfigmotors für 200 PS	462
2. Nachrechnung eines Kurzschlußmotors mit Hochstabläufer für 1000 PS	466
3. Nachrechnung eines Frequenzumformers	469
4. Nachrechnung eines Einphasenmotors ohne Hilfswicklung für 0,33 kW, 220 V, 1440 U/min.	472
5. Nachrechnung eines Spaltemotors für 5 W, 220 V, 2700 U/min	477
Literaturverzeichnis	483
Bedeutung der verwendeten Formelzeichen	488
Zusammenstellung der wichtigsten Einheiten	497
Sachverzeichnis	498