

*Gerhard Müller, Karl Vogt und Bernd Ponick*

## **Berechnung elektrischer Maschinen**

6., völlig neu bearbeitete Auflage



**WILEY-  
VCH**

**WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA**

## Inhaltsverzeichnis

|                               |  |
|-------------------------------|--|
| <b>Vorwort zur 6. Auflage</b> | <b>V</b>   |
| <b>Vorwort zur 1. Auflage</b> | <b>IX</b>  |
| <b>Formelzeichen</b>          | <b>XVII</b>  |
| <b>1</b>                      | <b>Wicklungen rotierender elektrischer Maschinen 1</b>                         |
| 1.1                           | Allgemeine Bezeichnungen und Gesetzmäßigkeiten 2                               |
| 1.1.1                         | Allgemeine Bezeichnungen von am Energieumsatz beteiligten<br>Wicklungen 3      |
| 1.1.2                         | Allgemeine Gesetzmäßigkeiten von am Energieumsatz beteiligten<br>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                                   |
| <b>2</b>                      | <b>Magnetischer Kreis 175</b>  |
| 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 Teilstrefelder 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 Finiten-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