
Elektrische Maschinen und Antriebe

Andreas Binder

Elektrische Maschinen und Antriebe

Übungsbuch: Aufgaben mit Lösungsweg

2. aktualisierte und erweiterte Auflage

Andreas Binder
Darmstadt, Deutschland

ISBN 978-3-662-53542-4 ISBN 978-3-662-53543-1 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-662-53543-1

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Springer Vieweg

© Springer-Verlag GmbH Deutschland 2012, 2017

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk 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.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer-Verlag GmbH Deutschland
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

*Für Brigitte, Anna, Josef, Franziska, Elisabeth und
Simon,
die mit großer Geduld die Entstehung dieses
Buches begleitet haben.*

Vorwort zur zweiten Auflage

Liebe Leserin! Lieber Leser!

Dank der guten Aufnahme dieser Aufgabensammlung durch eine interessierte Leserschaft ist nun eine zweite Auflage entstanden. Diverse Fehler, die mir auch dankenswerter Weise von Lesern mitgeteilt wurden, wurden ausgebessert. Weitere grundlegende Übungsbeispiele zu den vier Grundtypen der E-Maschine (Gleichstrommaschine, Synchronmaschine, Asynchronmaschine mit Schleifring- und Käfigläufer) wurden ergänzt, ebenso einige „Lehrbeispiele“, die etwas länger sind und grundsätzliche Sachverhalte erläutern sollen. Einige Beispiele zur Dynamik der Synchronmaschine in ihren Sonderformen mit Permanentmagneterregung und als synchrone Reluktanzmaschine wurden ebenfalls aufgenommen.

Die Beispiele sind weiterhin je Themengebiet nicht nach ihrem Schwierigkeitsgrad geordnet, sondern bunt gemischt. Die geneigte Leserschaft soll so selbst bei der Durchsicht der Beispiele an sich testen, ob ihr das Niveau eines Beispiels zusagt oder nicht. Durch dieses „Probieren“ kommt man auch Übungsbeispielen mit einem Schwierigkeitsgrad näher, den man sich vielleicht von vorne herein gar nicht vorgenommen hatte, aber bei näherem Hinsehen merkt, dass es gar nicht so „schlimm“ ist.

Ich danke Herrn M. Sc. Sascha Neusüs für das Korrekturlesen und für zahlreiche Formatierungsarbeiten, und Frau Anette Ptaschek, beide vom Institut für Elektrische Energiewandlung, TU Darmstadt, für die Umsetzung der zusätzlichen technischen Abbildungen in Autocad. Dem Springer-Verlag danke ich für die gute Zusammenarbeit. Für Hinweise zu etwaigen Fehlern bin ich weiterhin dankbar und natürlich zu Anregungen zur Verbesserung der Buchgestaltung offen.

Andreas Binder
Darmstadt, im Juni 2017

Vorwort

Liebe Leserin! Lieber Leser!

Mit dieser Aufgabensammlung zur Berechnung des Betriebsverhaltens elektrischer Maschinen und Antriebe ist ein Begleitband zu dem Buch „Elektrische Maschinen und Antriebe“ entstanden, der es Ihnen ermöglichen soll, sich im Selbststudium die Berechnungsmethodik zu erarbeiten. Die Aufgaben bestehen aus Fragestellung und komplettem Lösungsweg. Ich empfehle Ihnen, zunächst mit Ihrem Wissen zu versuchen, die Aufgaben selbstständig zu lösen, und nur bei Schwierigkeiten den Lösungsweg heranzuziehen. Da die Aufgaben in Unterpunkte gegliedert sind, versuchen Sie diese Arbeitsmethode auf jeden Unterpunkt anzuwenden. Die Kapitelnummerierung der Aufgaben folgt streng der Kapitelnummerierung im Buch „Elektrische Maschinen und Antriebe“, so dass es leicht ist, entsprechende Querbezüge herzustellen. Ebenso beziehen sich Querverweise wie z. B. „siehe Bild 4.8-1“ auf das entsprechende Bild im Buch „Elektrische Maschinen und Antriebe“. Sollten Sie aber ein anderes Grundlagenbuch verwenden, so ist durch die Gliederung der Aufgaben nach den einzelnen Maschinentypen ebenfalls leicht ein Bezug zu diesem Grundlagenbuch herstellbar, da die meisten Grundlagenbücher über elektrische Maschinen einer ähnlichen Gliederung folgen. Die Beispiele wurden von mir selbst erstellt und durchgerechnet, wobei ich auf eine reiche Auswahl von Beispielen meines Lehrers em. o. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. habil. Hans Kleinrath († 2010), TU Wien, und meines Amtsvorgängers em. Prof. Dr.-Ing. Egon-Christian Andresen († 2010), TU Darmstadt, zurückgreifen konnte. Danken möchte ich Herrn em. Prof. Dr.-Ing. Manfred Liese, TU Dresden, für die Durchsicht des Manuskripts, Herrn Dipl.-Ing. Dr. techn. Georg Traxler-Samek, Alstom Hydrogeneratoren, Birr, Schweiz, für die gründliche Kontrolle der Beispiele, den Herren Dipl.-Ing. Stefan Dewenter, M.Sc. Nam Anh Dinh Ngoc, Dipl.-Ing. Thomas Knopik, Dipl.-Ing. Fabian Mink, für das Korrekturlesen und für zahlreiche Formatierungsarbeiten, und Frau Anette Ptaschek, alle vom Institut für Elektrische Energiewandlung, TU Darmstadt, für die Umsetzung der technischen Abbildungen in Autocad. Dem Springer-Verlag danke ich für die gute Zusammenarbeit. Meiner

Gattin Brigitte und unseren Kindern Anna, Josef, Franziska, Elisabeth und Simon danke ich für das mir entgegengebrachte Verständnis, dass diese schriftstellerische Tätigkeit an zahlreichen Wochenenden und vielen Abendstunden unter der Woche der Familie den Gatten bzw. den Vater entzogen hat.

Ich wünsche den Leserinnen und Lesern bei der Lektüre dieses Buches den ersehnten Erkenntnisgewinn und bin für Hinweise zu etwaigen Fehlern dankbar und zu Anregungen zur Verbesserung der Buchgestaltung offen. Über das Sekretariat des Instituts für Elektrische Energiewandlung, TU Darmstadt, bin ich für Zuschriften erreichbar. Möge dieses Buch seinen Beitrag zur Ausbildung künftiger Ingenieursgenerationen auf dem Gebiet der elektrischen Maschinen und Antriebe leisten.

Andreas Binder
Darmstadt, im Januar 2012

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| 1. Grundlagen elektromechanischer Energiewandler | 1 |
| Aufgabe A1.1: Magnetischer Eisenkreis | 1 |
| Aufgabe A1.2: Ruhinduktion..... | 4 |
| Aufgabe A1.3: Bewegungsinduktion..... | 6 |
| Aufgabe A1.4: Bewegter stromdurchflossener Leiter im Magnetfeld.... | 9 |
| Aufgabe A1.5: Drehstromsystem | 15 |
| Aufgabe A1.6: Faraday'sche Scheibe..... | 20 |
| Aufgabe A1.7: Ablenkmagnet..... | 25 |
| Aufgabe A1.8: Kraft auf einen stromdurchflossenen Leiter im Homogenfeld | 28 |
| Aufgabe A1.9: Bewegungsinduktion in eine linear bewegte Spule im Homogenfeld | 30 |
| Aufgabe A1.10: Ruh- und Bewegungsinduktion in eine rotierende Spule | 33 |
| Aufgabe A1.11: Ruh- und Bewegungsinduktion als Sonderformen des allgemeinen Induktionsgesetzes..... | 36 |
| | |
| 2. Wicklungen für Drehfelder in elektrischen Maschinen | 43 |
| Aufgabe A2.1: Felderregerkurve einer Drehstrom-Ganzloch- wicklung..... | 43 |
| Aufgabe A2.2: Wicklungsschema und Felderregerkurve einer Drehstrom-Zweischichtwicklung..... | 44 |
| Aufgabe A2.3: Drehstrom-Halbloch-Zweischichtwicklung..... | 47 |
| Aufgabe A2.4: Drehstrom-Halbloch-Einschichtwicklung | 48 |
| Aufgabe A2.5: Drehstrom-Bruchloch-Zweischichtwicklung mit ungeradem Bruchlochnenner | 49 |
| Aufgabe A2.6: Konzentrierte Drehstrom-Bruchloch- Zweischichtwicklung | 51 |
| Aufgabe A2.7: Drehstrom-Bruchloch-Zweischichtwicklung eines Rohrmühlenantriebs..... | 53 |

| | |
|---|-----------|
| 3. Mathematische Analyse von Luftspaltfeldern..... | 57 |
| Aufgabe A3.1: Fourier-Analyse der Feldverteilung einer Drehstromwicklung | 57 |
| Aufgabe A3.2: Fourier-Analyse der Feldverteilung einer Käfig- wicklung..... | 59 |
| Aufgabe A3.3: Fourier-Analyse der Rotor-Feldverteilung einer Permanentmagnet-Synchronmaschine | 60 |
| Aufgabe A3.4: Fourier-Analyse der Ständer-Feldverteilung eines Einphasen-Synchrongenerators..... | 61 |
| Aufgabe A3.5: Fourier-Analyse der Ständer-Feldverteilung einer dreisträngigen Sechszonen-Zweischicht- Bruchlochwicklung | 63 |
| Aufgabe A3.6: Fourier-Analyse der Ständer-Feldverteilung einer zweisträngigen Vierzonen-Einschicht- Ganzlochwicklung | 65 |
| Aufgabe A3.7: Fourier-Analyse der Ständer-Feldverteilung einer sechsträngigen Zwölfzonen-Einschicht- Ganzlochwicklung | 66 |
| Aufgabe A3.8: Fourier-Analyse der Ständer-Feldverteilung der Zahnspulenwicklungen $q = \frac{1}{2}$ und $q = \frac{1}{4}$ | 68 |
| | |
| 4. Induzierte Spannung und magnetische Kräfte in Drehstrommaschinen..... | 71 |
| Aufgabe A4.1: Drehstromwicklung eines Synchrongenerators..... | 71 |
| Aufgabe A4.2: Synchron-Einphasen-Bahngenerator | 72 |
| Aufgabe A4.3: Getriebeloser Synchron-Windgenerator | 76 |
| Aufgabe A4.4: Radialkraft auf die Nutenleiter einer Zweischichtwicklung..... | 78 |
| Aufgabe A4.5: Induzierte Spannung in eine Einschicht- Bruchlochwicklung | 82 |
| Aufgabe A4.6: Oberfelder-Streuziffer einer Zahnspulen-Wicklung | 83 |
| Aufgabe A4.7: Grobdimensionierung einer Drehfeldmaschine | 86 |
| Aufgabe A4.8: Spannungsinduktion in eine in Nuten liegende Spule.. | 87 |
| | |
| 5. Die Schleifringläufer-Asynchronmaschine..... | 97 |
| Aufgabe A5.1: Saugzuggebläse-Antrieb | 97 |
| Aufgabe A5.2: Kreisdiagramm mit Ummagnetisierungs- und Reibungsverlusten..... | 98 |
| Aufgabe A5.3: Antrieb für Schweranlauf..... | 100 |
| Aufgabe A5.4: Ossanna-Kreis und Schlupfgerade aus Messdaten..... | 103 |
| Aufgabe A5.5: Betriebskennlinie einer Asynchronmaschine..... | 108 |

| | |
|---|------------|
| Aufgabe A5.6: Vereinfachtes Ersatzschaltbild der Asynchronmaschine | 113 |
| 6. Die Kurzschlussläufer-Asynchronmaschine..... | 119 |
| Aufgabe A6.1: Zentrifugen-Antrieb | 119 |
| Aufgabe A6.2: Antrieb für eine Holzverarbeitungsmaschine..... | 123 |
| Aufgabe A6.3: Zentralantrieb einer Spinnmaschine..... | 126 |
| Aufgabe A6.4: Energiesparmotor | 128 |
| Aufgabe A6.5: Kondensatormotor..... | 129 |
| Aufgabe A6.6: Dreieckschaltung eines Asynchronmotors..... | 143 |
| Aufgabe A6.7: Verluste in einer Asynchronmaschine | 147 |
| Aufgabe A6.8: Verlustbilanz einer Asynchronmaschine | 148 |
| 7. Antriebstechnik mit der Asynchronmaschine..... | 151 |
| Aufgabe A7.1: Kesselspeisepumpen-Antrieb..... | 151 |
| Aufgabe A7.2: Grundwasser-Pumpenstation | 152 |
| Aufgabe A7.3: Tunnellüfter-Motor | 155 |
| Aufgabe A7.4: Bahnantrieb | 157 |
| Aufgabe A7.5: Elektroauto-Antrieb | 160 |
| Aufgabe A7.6: Blindleistungskompensation bei einer Asynchronmaschine..... | 164 |
| Aufgabe A7.7: Antriebsprojektierung mit einer Asynchron- maschine | 166 |
| Aufgabe A7.8: Asynchronmaschine als Aufzugsantrieb | 169 |
| Aufgabe A7.9: Asynchronantrieb für einen Hochgeschwindigkeits- Triebzug..... | 172 |
| Aufgabe A7.10: Blindleistungskompensation in einem Industrie- betrieb | 173 |
| Aufgabe A7.11: Pumpenantrieb bei schwankender Netzspannungsfrequenz | 175 |
| 8. Die elektrisch erregte Synchronmaschine | 181 |
| Aufgabe A8.1: Diesel-Generator | 181 |
| Aufgabe A8.2: Wasserkraftwerk-Generator..... | 184 |
| Aufgabe A8.3: Flusskraftwerks-Generator..... | 186 |
| Aufgabe A8.4: Gebläse-Synchronmotor | 190 |
| Aufgabe A8.5: Synchronreaktanz eines Synchrongenerators..... | 193 |
| Aufgabe A8.6: Eigenbedarfs-Generator | 196 |
| Aufgabe A8.7: Umrichter gespeister Walzwerks-Synchronmotor | 199 |
| Aufgabe A8.8: Auslegungsdaten eines Turbogenerators | 206 |

| | |
|---|------------|
| Aufgabe A8.9: Zeigerdiagramm und Kippmoment eines Turbogenerators | 209 |
| Aufgabe A8.10: Auslegungsparameter einer Lichtmaschine | 211 |
| Aufgabe A8.11: Synchrongenerator in einem Speicherkraftwerk | 215 |
| Aufgabe A8.12: Synchrongenerator in einem Pumpspeicherkraftwerk | 217 |
| Aufgabe A8.13: Parallel arbeitende Synchrongeneratoren | 221 |
| Aufgabe A8.14: Synchronmotor als Gebläseantrieb | 223 |
| Aufgabe A8.15: Synchronmotor versus Asynchronmotor | 226 |
| Aufgabe A8.16: Synchrongenerator und Blocktransformator | 229 |
| 9. Permanentmagneterregte Synchronmaschinen | 235 |
| Aufgabe A9.1: Permanentmagnetmotor als Werkzeugmaschinenantrieb | 235 |
| Aufgabe A9.2: Roboterantrieb | 239 |
| Aufgabe A9.3: Hi-Speed-Kompressor-Antrieb | 244 |
| Aufgabe A9.4: Entmagnetisierfestigkeit von Permanentmagneten | 246 |
| Aufgabe A9.5: Auslegungsmerkmale eines PM-Synchronservomotors | 251 |
| 10. Reluktanzmaschinen und Schrittmotoren | 261 |
| Aufgabe A10.1: Bemessung einer geschalteten Reluktanzmaschine .. | 261 |
| Aufgabe A10.2: Drehmoment-Drehzahl-Kennlinie einer geschalteten Reluktanzmaschine | 264 |
| Aufgabe A10.3: Drehmoment einer Synchron-Reluktanzmaschine... 266 | |
| Aufgabe A10.4: Zeigerdiagramm einer Synchron-Reluktanzmaschine | 268 |
| 11. Gleichstromantriebe | 271 |
| Aufgabe A11.1: Gleichstrom-Hubwerkantrieb | 271 |
| Aufgabe A11.2: Elektrische Bremsmethoden für fremderregte Gleichstrommaschinen | 274 |
| Aufgabe A11.3: Gleichstromantrieb für ein Grubenfahrzeug | 280 |
| Aufgabe A11.4: Umformer-Antrieb | 284 |
| Aufgabe A11.5: Stromrichter gespeister Gleichstromantrieb | 287 |
| Aufgabe A11.6: Fremderregter Gleichstromantrieb | 293 |
| Aufgabe A11.7: Induzierte Ankerspannung | 297 |
| Aufgabe A11.8: Sechspolige Schleifenwicklung | 301 |
| Aufgabe A11.9: Kennlinie eines fremderregten Gleichstrommotors .. | 303 |
| Aufgabe A11.10: Gleichstrom-Aufzugsmotor | 305 |
| Aufgabe A11.11: Fremderregter Gleichstromgenerator | 307 |
| Aufgabe A11.12: Fremderregter Gleichstrommotor | 310 |

| | |
|---|------------|
| Aufgabe A11.13: Vierpoliger fremderregter Gleichstrommotor | 313 |
| Aufgabe A11.14: Kleiner fremderregter Gleichstrommotor | 314 |
| Aufgabe A11.15: Auslegungsparameter einer Gleichstrommaschine | 317 |
| Aufgabe A11.16: U-Boot-Gleichstrommaschine | 320 |
| Aufgabe A11.17: Gleichstrom-Nebenschlussmaschine | 322 |
| Aufgabe A11.18: Gleichstrommaschine an langer Leitung..... | 325 |
| Aufgabe A11.19: Permanentmagneterregter Gleichstrommotor | 326 |
| 12. Dynamik elektrischer Maschinen..... | 331 |
| Aufgabe A12.1: Einschalten einer Drosselspule | 331 |
| Aufgabe A12.2: Selbsterregung eines Synchrongenerators | 335 |
| Aufgabe A12.3: Mechanisch gebremster Auslauf einer rotierenden Maschine..... | 341 |
| Aufgabe A12.4: Asynchroner Schwungmassen-Hochlauf einer Asynchronmaschine..... | 344 |
| 13. Dynamik der Gleichstrommaschine..... | 347 |
| Aufgabe A13.1: Permanentmagneterregter Gleichstrommotor mit Chopper-Steuerung | 347 |
| Aufgabe A13.2: Die Selbsterregung der Nebenschluss-Maschine..... | 351 |
| Aufgabe A13.3: Generatorisches Bremsen eines Reihenschluss-Motors auf einen Bremswiderstand..... | 353 |
| Aufgabe A13.4: Ankerstromverlauf bei B6C-Speisung | 359 |
| Aufgabe A13.5: Hochlauf eines kleinen Gleichstrommotors..... | 364 |
| Aufgabe A13.6: Kurzschlussbremsung eines Universalmotors..... | 368 |
| 14. Raumzeigerrechnung und bezogene Größen | 379 |
| Aufgabe A14.1: Nullspannungssystem in der Ständerwicklung eines Synchrongenerators..... | 379 |
| Aufgabe A14.2: Spannungsraumzeiger und Nullspannungssystem bei Umrichterspeisung | 381 |
| 15. Dynamik der Asynchronmaschine | 385 |
| Aufgabe A15.1: Abschalten einer dreiphasigen Asynchron- maschine | 385 |
| Aufgabe A15.2: Stromspeisung einer blockierten Asynchron- maschine | 388 |
| Aufgabe A15.3: Asymmetrische Spannungspeisung der Ständerwicklung bei angeschlossenem Sternpunkt . | 391 |
| Aufgabe A15.4: Asymmetrische Spannungspeisung der Ständerwicklung bei isoliertem Sternpunkt | 400 |

| | |
|--|------------|
| Aufgabe A15.5: Beanspruchung einer Asynchronmaschine bei Stoßkurzschluss und Sammelschienen- umschaltung | 405 |
| 16. Dynamik der Synchronmaschine | 413 |
| Aufgabe A16.1: Stoßkurzschluss bei einem Wasserkraftwerks- Generator | 413 |
| Aufgabe A16.2: Dynamische Reaktanzen einer Schenkelpol- Synchronmaschine | 415 |
| Aufgabe A16.3: Feldorientierter Betrieb einer Permanentmagnet- Synchronmaschine | 416 |
| Aufgabe A16.4: Umrichter gespeister Permanentmagnet-Synchronmotor bei Stillstand | 419 |
| Aufgabe A16.5: Umrichter gespeister Hochleistungs-Synchronantrieb für Kompressoren..... | 424 |
| Aufgabe A16.6: Stator- und rotorseitige Anfangskurz- schlusswechselströme | 429 |
| Aufgabe A16.7: Stoßkurzschlussstrom einer PM-Synchron- maschine | 433 |
| Aufgabe A16.8: Stoßkurzschlussmoment einer PM-Synchron- maschine | 441 |
| Aufgabe A16.9: Stromortskurve und allpoliger Stoßkurzschluss eines Synchron-Reluktanzmotors..... | 447 |
| Literatur | 463 |
| Monographien..... | 463 |
| Weiterführende Fachbücher..... | 464 |
| Beitragswerke | 469 |
| Zeitschriftenbeiträge | 469 |
| Konferenzbeiträge | 481 |
| Dissertationen, Habilitationen | 484 |
| Druckschriften | 488 |
| Sachverzeichnis | 489 |

Allgemeines

Das griechische Alphabet

| | | | | | |
|-----------------|----------|--------------------|---------|-----------------|----------|
| $A \alpha$ | Alpha | $B \beta$ | Beta | $\Gamma \gamma$ | Gamma |
| $\Delta \delta$ | Delta | $E \varepsilon$ | Epsilon | $Z \zeta$ | Zeta |
| $H \eta$ | Eta | $\Theta \vartheta$ | Theta | $I \iota$ | Jota |
| $K \kappa$ | Kappa | $\Lambda \lambda$ | Lambda | $M \mu$ | My (mue) |
| $N \nu$ | Ny (nue) | $\Xi \xi$ | Xi | $O \omicron$ | Omikron |
| $\Pi \pi$ | Pi | $\rho \rho$ | Rho | $\Sigma \sigma$ | Sigma |
| $T \tau$ | Tau | $Y \upsilon$ | Ypsilon | $\Phi \phi$ | Phi |
| $X \chi$ | Chi | $\Psi \psi$ | Psi | $\Omega \omega$ | Omega |

Auswahl der wichtigsten Formelzeichen und Symbole

(Die Formelzeichen werden im Text erläutert an der ersten Stelle ihres Auftretens!)

| | | |
|-------------------|----------------|--|
| a | - | Anzahl paralleler Wicklungsarme bei Drehfeldmaschinen, aber: HALBE Anzahl paralleler Wicklungsarme bei Gleichstrommaschinen |
| a_i | | Anzahl paralleler Leiter je Windung |
| A | A/m | Strombelag |
| A | m ² | Fläche |
| b | m | Breite |
| b_p | m | Polschuhbreite |
| b_{Stab} | m | Stabbreite |
| B | T | magnetische Induktion (magnetische Flussdichte) |
| c_d, c_q | - | Feldfaktoren der Längs-, Querachse |
| c_g | Nm/rad | Ersatzfederkonstante der Synchronmaschine |

| | | |
|-----------------|--|--|
| C | $\text{kVA}\cdot\text{min}/\text{m}^3$ | Esson'sche Ausnutzungsziffer |
| C | m | Integrationsweg |
| d_E | m | Eindringtiefe |
| d_{si} | m | Bohrungsdurchmesser |
| D | As/m^2 | elektrische Verschiebung (elektrische Flussdichte) |
| E | V/m | elektrische Feldstärke |
| f | Hz | elektrische Frequenz |
| F | N | Kraft |
| g | - | ganze Zahl |
| g | m/s^2 | Erdbeschleunigung ($9.81 \text{ m}/\text{s}^2$) |
| h | m | Höhe |
| H | A/m | magnetische Feldstärke |
| I | A | elektrische Stromstärke |
| j | - | imaginäre Einheit |
| J | A/m^2 | elektrische Stromdichte |
| J | $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ | polares Trägheitsmoment |
| k | - | Ordnungszahl |
| k_C | - | Carter-Faktor |
| k_d | - | Zonenfaktor |
| k_{Fe} | - | Eisenfüllfaktor |
| k_K | - | Leerlauf-Kurzschluss-Verhältnis |
| k_p | - | Sehnungsfaktor |
| k_R, k_L | - | Stromverdrängungsfaktoren |
| k_R | $\text{V}\cdot\text{s}/\text{A}$ | Proportionalitätskonstante der Reaktanzspannung |
| k_w | - | Wicklungsfaktor |
| K | - | Anzahl der Kommutatorsegmente |
| l | m | Länge (axial) |
| l_e | m | ideelle Eisenlänge |
| L | H | Selbstinduktivität |
| L | m | Gesamtlänge |
| L_p | dB | Schalldruckpegel |
| m | - | Strangzahl |
| m | kg | Masse |
| M | H | Gegeninduktivität |
| M | Nm | Drehmoment |
| M_b | Nm | asynchrones statisches Kippmoment |
| M_{p0} | Nm | synchrones statisches Kippmoment |
| M_s | Nm | Kupplungsmoment, Wellenmoment (shaft) |
| M_1 | Nm | Anfahrmoment der Asynchronmaschine (Schlupf $s = 1$) |

| | | |
|--------------------------|-----------------|--|
| n | 1/s | Drehzahl |
| N | - | Windungszahl je Strang |
| N_c | - | Spulenwindungszahl |
| p | - | Polpaarzahl |
| p | W/kg | Leistungsdichte |
| P | W | Wirkleistung |
| q | - | Lochzahl (Nuten pro Pol und Strang) |
| Q | - | Nutzahl |
| \underline{Q} | VA _r | Blindleistung (1 VA _r = 1 VA reaktiv) |
| R | Ω | elektrischer Widerstand |
| r | - | elektrischer Widerstand in „per unit“-Angabe |
| r | - | Kraftwellenordnungszahl |
| s | - | Schlupf |
| s | 1/s | Laplace-Operator |
| s | m | Weglänge |
| s_Q | m | Nutöffnungsbreite |
| S | VA | Scheinleistung |
| t | s | Zeit |
| T | s | Zeitkonstante, Periodendauer |
| T_J | s | Nenn-Anlaufdauer |
| u | - | Spulenseiten je Nut und Schicht |
| U | V | elektrische Spannung |
| U_f | V | elektrische Spannung der Erregerwicklung |
| U_p | V | Polradspannung |
| \ddot{u} | - | Übersetzungsverhältnis |
| \ddot{u}_U, \ddot{u}_I | - | Spannungs-, Stromübersetzungsverhältnis |
| v | m/s | Geschwindigkeit |
| v_{10} | W/kg | Ummagnetisierungsverluste bei 1.0 T, 50 Hz je 1 kg |
| v_{15} | W/kg | Ummagnetisierungsverluste bei 1.5 T, 50 Hz je 1 kg |
| V | A | magnetische Spannung |
| V | m ³ | Volumen |
| W | J | Energie |
| W | m | Spulenweite |
| x | m | Umfangskoordinate |
| X | Ω | Reaktanz |
| X_d, X_q | Ω | synchrone Längs-, Querreaktanz |
| y | - | Weite einer Spule, gezählt in Nutteilungen |
| z | - | gesamte Leiterzahl |
| Z | Ω | Impedanz |

| | | |
|---------------|---------|--|
| α | rad | Zündwinkel |
| α_e | - | äquivalente (ideelle) Polbedeckung |
| α_Q | rad | Nutwinkel |
| γ | rad | Umfangswinkel |
| δ | m | Luftspaltweite |
| δ_e | m | äquivalente (ideelle) Luftspaltweite |
| ε | As/(Vm) | Dielektrizitätskonstante |
| η | - | Wirkungsgrad |
| ϑ | rad | Polradwinkel |
| Θ | A | elektrische Durchflutung |
| κ | S/m | elektrische Leitfähigkeit |
| Λ | Vs/A | magnetischer Leitwert |
| μ | - | Ordnungszahl |
| μ | Vs/(Am) | magnetische Permeabilität |
| μ_0 | Vs/(Am) | magnetische Permeabilität des Vakuums ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/(Am)) |
| ν | - | Ordnungszahl |
| ξ | - | „reduzierte“ Leiterhöhe |
| σ | - | Blondel'scher Koeffizient der Gesamtstreuung, Streuziffer |
| σ_0 | - | Streuziffer der Oberfelderstreuung |
| τ_c | m | Kommutatorstegeteilung |
| τ_Q | m | Nutteilung |
| τ_p | m | Polteilung |
| φ | rad | Phasenwinkel |
| Φ | Wb | magnetischer Fluss |
| Ψ | Vs | magnetische Flussverkeftung |
| ω | 1/s | elektrische Kreisfrequenz |
| Ω_m | 1/s | mechanische Winkelgeschwindigkeit |
| Ω | 1/s | elektrische Winkelgeschwindigkeit |

Indizes

| | |
|---------|----------------------------|
| a | Anker, aussen |
| av | Mittelwert |
| b | Bürste, asynchrones Kippen |
| B, Batt | Batterie |
| c | Spule, Kommutator |
| com | Kommutierungs- |
| C | Koerzitiv- |

| | |
|----------|---|
| Cu | Kupfer |
| d | direct (längs), DC (Gleichgröße), Zone (distribution), Verluste (dissipation) |
| D | Dämpferwicklung in der Längsachse |
| dyn | dynamisch |
| e | elektrisch, äquivalent |
| f | Feld |
| fr | Reibung |
| Fe | Eisen |
| Ft | Foucault-Verluste (Wirbelstromverluste) |
| ges | gesättigt, gesamt |
| h | Haupt- |
| i | induziert, innen |
| <i>i</i> | Zählvariable |
| in | zugeführt |
| k | Kurzschluss- |
| LL | verkettet (Linienspannung) |
| m | Magnetisierungs- |
| m | mechanisch |
| mag | magnetisch |
| N | Nenn |
| out | abgegeben |
| o | Oberfelder |
| p | Pol, Polrad, Sehnung (pitch) |
| ph | Phasenwert |
| q | quadrature (quer) |
| Q | Dämpferwicklung in der Querachse |
| Q | Nut |
| r | Rotor |
| R | Reaktanz- (Gleichstrommaschine), Remanenz, Reibung |
| s | Stator |
| s | Welle (shaft) |
| S | Strang |
| syn | Synchron |
| sh | Shunt |
| T | Takt |
| v | Vorwiderstand |
| w | Wicklung |
| W | Wendepol |
| y | Joch |
| Z | Zusatzverluste, Zugkraft |

| | |
|----------|--|
| δ | Luftspalt |
| σ | Streu- |
| 0 | Leerlauf |
| 1 | Anfahrpunkt ($s = 1$ bei Asynchronmaschine) |

Notationen

| | |
|--------------------|---|
| i | Kleinbuchstabe: z.B.: elektrische Stromstärke, Augenblickswert |
| I | Großbuchstabe: z.B.: elektrische Stromstärke, Effektivwert oder Gleichstrom-Wert |
| X, x | Großbuchstabe: z.B. Reaktanz, Kleinbuchstabe: z.B. bezogene Reaktanz (p.u. -Wert) |
| \underline{I} | unterstrichen: komplexe Größe |
| \hat{I} | Spitzenwert, Amplitude |
| I' | auf Ständerwicklungsdaten umgerechnet |
| X', X'' | transiente, subtransiente Reaktanz |
| \underline{I}^* | konjugiert komplexer Wert von \underline{I} |
| $\text{Re}(\cdot)$ | Realteil von ... |
| $\text{Im}(\cdot)$ | Imaginärteil von ... |

Verwendete Abkürzungen

| | |
|------|---|
| B2H | Halbgesteuerte zweipulsige Gleichrichterbrücke |
| B2C | Vollgesteuerte zweipulsige Gleichrichterbrücke |
| B6C | Vollgesteuerte sechspulsige Gleichrichterbrücke |
| EZS | Erzeugerzählpeilsystem |
| GR | Gleichrichter |
| IGBT | Insulated Gate Bipolar Transistor |
| IVP | Induktiver Vollastpunkt |
| PEM | Polymer-Elektrolyt-Membran |
| PM | Permanentmagnete |
| PWM | Pulsweitenmodulation |
| PKW | Personenkraftwagen |
| ü.e. | übererregt |
| u.e. | untererregt |
| VZS | Verbraucherzählpeilsystem |
| WR | Wechselrichter |
| ZK | Zwischenkreis |