

Wissenschaftliche Reihe
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Maximilian Andreas Weber

Echtzeitfähige
Verlustmodellierung
im elektrischen Antrieb
für Elektro- und
Hybridfahrzeuganwendungen



Universität Stuttgart



Springer Vieweg

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

Reihe herausgegeben von

Michael Bargende, Stuttgart, Deutschland

Hans-Christian Reuss, Stuttgart, Deutschland

Jochen Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) an der Universität Stuttgart erforscht, entwickelt, appliziert und erprobt, in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, Elemente bzw. Technologien aus dem Bereich moderner Fahrzeugkonzepte. Das Institut gliedert sich in die drei Bereiche Kraftfahrwesen, Fahrzeugantriebe und Kraftfahrzeug-Mechatronik. Aufgabe dieser Bereiche ist die Ausarbeitung des Themengebietes im Prüfstandsbetrieb, in Theorie und Simulation. Schwerpunkte des Kraftfahrwesens sind hierbei die Aerodynamik, Akustik (NVH), Fahrdynamik und Fahrermodellierung, Leichtbau, Sicherheit, Kraftübertragung sowie Energie und Thermomanagement – auch in Verbindung mit hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten. Der Bereich Fahrzeugantriebe widmet sich den Themen Brennverfahrensentwicklung einschließlich Regelungs- und Steuerungskonzeptionen bei zugleich minimierten Emissionen, komplexe Abgasnachbehandlung, Aufladesysteme und -strategien, Hybridsysteme und Betriebsstrategien sowie mechanisch-akustischen Fragestellungen. Themen der Kraftfahrzeug-Mechatronik sind die Antriebsstrangregelung/ Hybride, Elektromobilität, Bordnetz und Energiemanagement, Funktions- und Softwareentwicklung sowie Test und Diagnose. Die Erfüllung dieser Aufgaben wird prüfstandsseitig neben vielem anderen unterstützt durch 19 Motorenprüfstände, zwei Rollenprüfstände, einen 1:1-Fahrsimulator, einen Antriebsstrangprüfstand, einen Thermowindkanal sowie einen 1:1-Aeroakustikwindkanal. Die wissenschaftliche Reihe „Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart“ präsentiert über die am Institut entstandenen Promotionen die hervorragenden Arbeitsergebnisse der Forschungstätigkeiten am IFS.

Reihe herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe
Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann
Lehrstuhl Kraftfahrwesen
Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik
Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Maximilian Andreas Weber

Echtzeitfähige Verlustmodellierung im elektrischen Antrieb für Elektro- und Hybridfahr- zeuganwendungen

 Springer Vieweg

Maximilian Andreas Weber
IFS, Fakultät 7, Lehrstuhl für
Kraftfahrzeugmechatronik
Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2024
D93

ISSN 2567-0042 ISSN 2567-0352 (electronic)
Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-44889-9 ISBN 978-3-658-44890-5 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-44890-5>

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

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en), exklusiv lizenziert an Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, ein Teil von Springer Nature 2024

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 allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten. 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.

Planung/Lektorat: Carina Reibold
Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature.
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Das Papier dieses Produkts ist recycelbar.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit in einer Entwicklungsabteilung für elektrische Antriebe der Robert Bosch GmbH in Kooperation mit dem Institut für Fahrzeugtechnik der Universität Stuttgart. An dieser Stelle möchte ich den Personen herzlich danken, die mich in meiner Zeit als Doktorand sowohl fachlich als auch persönlich begleitet und unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss. Die kompetente und vertrauensvolle Betreuung ermöglichte einen stets hilfreichen sowie motivierenden Gesprächsaustausch und legte einen wesentlichen Grundstein für das Gelingen dieser Arbeit. Darüber hinaus bedanke ich mich bei Frau Prof. Dr.-Ing. Nejila Parspour für die freundliche Übernahme des Mitberichts.

Gleichermaßen möchte ich mich bei Frau Dr. rer. nat. Michèle Hirsch und Herrn Dr.-Ing. Manuel Warwel von der Robert Bosch GmbH für die hervorragende Zusammenarbeit bedanken. Die vielen Diskussionen haben immer wieder zu kreativen Denkanstößen geführt und bereicherten sowohl die Breite als auch die Tiefe der behandelten Themen. Ihr entgegengebrachtes Vertrauen und Engagement wie auch ihr offenes Ohr haben essenziell dazu beigetragen, dass die Arbeit in dieser Form realisiert werden konnte.

Weiterhin bedanke ich mich bei allen Kolleg:innen innerhalb der Abteilung für den freundlichen und hilfsbereiten Umgang sowie die allseits angenehme Arbeitsatmosphäre. Ein ganz spezieller Dank gebührt Sebastian Busch, Lei Chen, Dr.-Ing. Gunther Götting, Manabendra Gupta, Dr.-Ing. Christian Hahn und Thomas Zeltwanger für deren Mithilfe auf fachlicher und organisatorischer Ebene. Nicht zuletzt danke ich den Doktoranden Yuping Chen und Philipp Wagner als auch den Student:innen Florian Andresen, Marco Kleinknecht, Pascal Koser, Martin Kögl, Nicolas Lomberg, Lukas Rendes, Jiaxin Sun und Timijan Velic für die konstruktiven aber auch unterhaltsamen Diskussionsrunden.

Schließlich möchte ich mich bei meiner Familie und meinen Freund:innen für ihre Unterstützung in den vergangenen Jahren außerordentlich bedanken. Allem voran und von ganzem Herzen danke ich meinen Eltern Helga und Johann

sowie meinen Brüdern Michael und Christian, die mich in meinem Handeln stets bekräftigt haben und ohne die alles nicht möglich gewesen wäre.

Graz

Maximilian Andreas Weber

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Vorwort | V |
| Abbildungsverzeichnis | IX |
| Tabellenverzeichnis | XIII |
| Abkürzungsverzeichnis | XV |
| Symbolverzeichnis | XVII |
| Kurzfassung | XXI |
| Abstract | XXIII |
| 1 Einleitung | 1 |
| 1.1 Herausforderungen | 1 |
| 1.2 Aufgabenstellung | 4 |
| 2 Grundlagen des elektrischen Antriebs | 7 |
| 2.1 Elektrischer Antrieb | 7 |
| 2.1.1 Batterie | 9 |
| 2.1.2 Inverter | 10 |
| 2.1.3 Maschine | 15 |
| 2.2 Spannungsmodulation | 18 |
| 2.2.1 Trägerfrequenz-Verfahren | 18 |
| 2.2.2 Winkelsynchrone Verfahren | 20 |
| 2.3 Harmonische Schwingung | 21 |
| 2.3.1 Spektralbetrachtung | 21 |
| 2.3.2 Verlustüberwachung | 24 |
| 3 Methoden der harmonischen Analyse | 25 |
| 3.1 Bestehende Ansätze | 25 |
| 3.1.1 Empirik | 26 |
| 3.1.2 Numerik | 27 |
| 3.1.3 Analytik | 28 |
| 3.2 Generischer Ansatz | 31 |
| 3.2.1 Konzeption | 32 |
| 3.2.2 Modifikation | 37 |
| 3.2.3 Diskussion | 49 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4 | Verlustmodellierung des Zwischenkreiskondensators | 57 |
| 4.1 | Modellbildung | 57 |
| 4.1.1 | Schaltvorgang | 58 |
| 4.1.2 | Kondensatorstrom | 61 |
| 4.1.3 | Verlustleistung | 66 |
| 4.2 | Offline-Verifikation | 68 |
| 4.3 | Modellreduktion | 71 |
| 4.3.1 | Strominklusion | 71 |
| 4.3.2 | Frequenzbündelung | 75 |
| 4.4 | Implementierung | 80 |
| 4.4.1 | Strategie | 81 |
| 4.4.2 | Algorithmus | 83 |
| 4.5 | Online-Verifikation | 87 |
| 4.6 | Diskussion | 93 |
| 5 | Verlustmodellierung der elektrischen Maschine | 95 |
| 5.1 | Modellbildung | 95 |
| 5.1.1 | Schaltvorgang | 96 |
| 5.1.2 | Magnetischer Fluss | 98 |
| 5.1.3 | Verlustleistung | 105 |
| 5.2 | Offline-Verifikation | 122 |
| 5.3 | Online-Verifikation | 124 |
| 5.4 | Diskussion | 125 |
| 6 | Schlussfolgerung | 127 |
| 6.1 | Ergebnisse | 127 |
| 6.2 | Ausblick | 130 |
| | Literaturverzeichnis | 133 |
| | Anhang | 149 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|--|----|
| 2.1 | Topologie des elektrischen Antriebs | 7 |
| 2.2 | Ersatzschaltbild des elektrischen Antriebs | 8 |
| 2.3 | Ersatzschaltbild der Leistungsmodule | 10 |
| 2.4 | Ersatzschaltbild des Zwischenkreiskondensators | 13 |
| 2.5 | Frequenzverhalten einer Kondensatorimpedanz | 14 |
| 2.6 | Segment einer permanenterregten Synchronmaschine | 16 |
| 2.7 | Ersatzschaltbild einer permanenterregten Synchronmaschine | 17 |
| 2.8 | Spannungshexagon und Pulsmuster einer Raumzeigermodulation | 19 |
| 2.9 | Spannungshexagon und Pulsmuster einer Blocktaktung | 21 |
| 2.10 | Frequenzbänder eines modulierten Signals | 22 |
| 2.11 | Frequenzverhalten eines modulierten Signals | 23 |
| 3.1 | Empirischer Ansatz zur harmonischen Analyse | 26 |
| 3.2 | Numerischer Ansatz zur harmonischen Analyse | 27 |
| 3.3 | Analytischer Ansatz zur harmonischen Analyse | 28 |
| 3.4 | Anwendung der doppelten Fourier-Reihe | 29 |
| 3.5 | Anwendung der einfachen Fourier-Reihe | 31 |
| 3.6 | Generischer Ansatz zur harmonischen Analyse | 33 |
| 3.7 | Zeit- und Frequenzverhalten einer Rechteckschwingung | 34 |
| 3.8 | Harmonische Analyse mittels Fourier-Reihe | 35 |
| 3.9 | Modifizierter Ansatz zur harmonische Analyse | 37 |
| 3.10 | Zeigerdiagramm des ersten Bausteins | 38 |
| 3.11 | Zeit- und Frequenzverhalten des ersten Bausteins | 39 |
| 3.12 | Zeigerdiagramm des zweiten Bausteins | 41 |
| 3.13 | Zeit- und Frequenzverhalten des zweiten Bausteins | 42 |
| 3.14 | Zeigerdiagramm des dritten Bausteins | 47 |
| 3.15 | Zeit- und Frequenzverhalten des dritten Bausteins | 48 |
| 3.16 | Harmonische Analyse mittels RFSC (a) | 50 |
| 3.17 | Harmonische Analyse mittels RFSC (b) | 54 |
| 4.1 | Verlustmodell des Zwischenkreiskondensators | 58 |
| 4.2 | Zeitverhalten eines modulierten Signals (a) | 59 |
| 4.3 | Zeitverhalten eines modulierten Signals (b) | 61 |
| 4.4 | Berechnungsschema des Kondensatorstroms | 62 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.5 | Zeit- und Frequenzverhalten des Inverterstroms | 64 |
| 4.6 | Zeit- und Frequenzverhalten des Kondensatorstroms | 65 |
| 4.7 | Frequenzverhalten des Serienwiderstandes | 66 |
| 4.8 | Frequenzverhalten der Kondensatorverluste | 67 |
| 4.9 | Offline-Simulation des Verlustmodells (a) | 70 |
| 4.10 | Offline-Simulation des Verlustmodells (b) | 70 |
| 4.11 | Modellreduktion durch Strominklusion | 72 |
| 4.12 | Offline-Verifikation des Verlustmodells nach Strominklusion | 74 |
| 4.13 | Modellreduktion durch Frequenzbündelung | 75 |
| 4.14 | Berechnungsschema zur Frequenzbündelung | 77 |
| 4.15 | Approximation der Verlustleistung durch Frequenzbündelung | 79 |
| 4.16 | Offline-Verifikation des Verlustmodells nach Frequenzbündelung | 80 |
| 4.17 | Sequenzierung des Verlustmodells | 81 |
| 4.18 | Implementierung des Verlustmodells (a) | 83 |
| 4.19 | Implementierung des Verlustmodells (b) | 84 |
| 4.20 | Online-Verifikation mittels HiL-Simulation | 87 |
| 4.21 | Online-Simulation des Verlustmodells (a) | 89 |
| 4.22 | Online-Simulation des Verlustmodells (b) | 91 |
| 4.23 | Online-Verifikation des Verlustmodells (a) | 92 |
| 4.24 | Online-Verifikation des Verlustmodells (b) | 93 |
| 5.1 | Verlustmodell der elektrischen Maschine | 96 |
| 5.2 | Zeitverhalten eines modulierten Signals (a) | 97 |
| 5.3 | Zeitverhalten eines modulierten Signals (b) | 99 |
| 5.4 | Berechnungsschema des Magnetflusses | 100 |
| 5.5 | Zeit- und Frequenzverhalten der $\alpha\beta$ -Spannungen (a) | 101 |
| 5.6 | Zeit- und Frequenzverhalten der $\alpha\beta$ -Spannungen (b) | 102 |
| 5.7 | Zeit- und Frequenzverhalten der dq -Spannungen (a) | 103 |
| 5.8 | Zeit- und Frequenzverhalten der dq -Spannungen (b) | 104 |
| 5.9 | Wirbelstromverluste in der Wicklung | 107 |
| 5.10 | Frequenzverhalten des Wicklungswiderstandes | 108 |
| 5.11 | Frequenzverhalten der Kupferverluste | 109 |
| 5.12 | Wirbelstromverluste im Eisenblech | 111 |
| 5.13 | Frequenzverhalten des Eisenersatzwiderstandes | 115 |
| 5.14 | Frequenzverhalten der Eisenverluste | 116 |
| 5.15 | Wirbelstromverluste im Permanentmagnet | 118 |
| 5.16 | Frequenzverhalten des Magnetersatzwiderstandes | 119 |

| | | |
|------|---|-----|
| 5.17 | Frequenzverhalten der Magnetverluste..... | 120 |
| 5.18 | Offline-Simulation des Verlustmodells (a) | 123 |
| 5.19 | Offline-Simulation des Verlustmodells (b) | 123 |
| 5.20 | Online-Verifikation des Verlustmodells | 124 |
| A.1 | Spannungsraumzeiger verschiedener Koordinatensystemen..... | 151 |
| B.1 | Fourier-Reihe einer periodischen Funktion | 151 |
| C.1 | Faltung im Zeitbereich | 157 |
| C.2 | Faltung im Frequenzbereich | 158 |
| D.1 | Verlustanalyse des Zwischenkreiskondensators..... | 159 |
| D.2 | Verlustanalyse der elektrischen Maschine..... | 160 |
| D.3 | Verlustanalyse der elektrischen Maschine (Grundswingungen) | 161 |
| D.4 | Verlustanalyse der elektrischen Maschine (Oberswingungen) | 162 |
| E.1 | Zeigerdarstellung zur grafischen Spektralanalyse | 165 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|---|-----|
| 2.1 | Schaltzustände und Spannungen eines Inverters | 12 |
| 3.1 | Bewertung von Ansätzen zur harmonischen Analyse | 55 |
| 4.1 | Recheneffizienz des Verlustmodells | 68 |
| 4.2 | Betriebspunkte der HiL-Simulation..... | 88 |
| 5.1 | Recheneffizienz des Verlustmodells | 121 |
| B.1 | Koeffizienten der Fourier-Reihe | 152 |
| B.2 | Eigenschaften der Fourier-Reihe | 154 |
| C.1 | Faltung im Zeit- und Frequenzbereich | 155 |

Abkürzungsverzeichnis

Bezeichnungen

| | |
|--------|--|
| AC | Alternate Current (Wechselstrom) |
| ASCET | Advanced Simulation and Control Engineering Tool |
| CAP | DC-Link Capacitor (Zwischenkreiskondensator) |
| D | Diode |
| DC | Direct Current (Gleichstrom) |
| ESL | Equivalent Series Inductance (Serieninduktivität) |
| ESR | Equivalent Series Resistance (Serienwiderstand) |
| FEM | Finite-Elemente-Methode |
| FFC | Fundamental Frequency Clocking (Grundfrequenztaktung) |
| FFT | Fast Fourier Transform (Fast-Fourier-Transformation) |
| FS | Fourier-Series (Fourier-Reihe) |
| HiL | Hardware-in-the-Loop (Hardware im Regelkreis) |
| HS | Highside (Hochseite) |
| HVB | High-Voltage Battery (Hochvoltbatterie) |
| ID | Identification (Identifikation) |
| IPCC | Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen) |
| KPI | Key-Performance-Indicator (Leistungskennzahl) |
| LS | Lowside (Tiefseite) |
| LSB | Lower Sideband (Unteres Seitenband) |
| MATLAB | Matrix Laboratory |
| MCU | Microcontroller Unit (Mikrocontroller) |
| PM | Power Module (Leistungsmodul) |
| PSM | Permanent-Magnet Synchronous Machine (Permanentmagneterregte Synchronmaschine) |
| PWM | Pulse Width Modulation (Pulsweitenmodulation) |
| RFSC | Reduced Fourier Series and Convolution |
| SSM | Six-Step Modulation (Blocktaktung) |
| SVPWM | Space-Vector Pulse Width Modulation (Raumzeigermodulation) |
| T | Transistor |

| | |
|--------|---|
| UNFCCC | United Nations Framework Convention on Climate Change (Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen) |
| USB | Upper Sideband (Oberes Seitenband) |
| VSI | Voltage-Source Inverter (Spannungsgeführter Wechselrichter) |

Symbolverzeichnis

Indizes

| | |
|------------|---|
| <i>Ac</i> | Alternate Current (Wechselstrom) |
| <i>Bat</i> | Battery (Batterie) |
| <i>Bdg</i> | Bridge (Brücke) |
| <i>Cap</i> | Capacitor (Kondensator) |
| <i>Cu</i> | Cuprum (Kupfer) |
| <i>Dc</i> | Direct Current (Gleichstrom) |
| <i>Ed</i> | Eddy Current (Wirbelstrom) |
| <i>Fe</i> | Ferrum (Eisen) |
| <i>Hy</i> | Hystersis (Hysterese) |
| <i>Inv</i> | Inverter (Wechselrichter) |
| <i>Pha</i> | Phase |
| <i>Pm</i> | Permanentmagnet |
| <i>Pr</i> | Proximity-Effekt |
| <i>Psm</i> | Permanentmagneterregte Synchronmaschine |
| <i>Rtr</i> | Rotor |
| <i>Sk</i> | Skin-Effekt |
| <i>Str</i> | Stator |
| <i>Tt</i> | Tooth (Zahn) |
| <i>Yk</i> | Yoke (Joch) |

Griechische Buchstaben

| | |
|---------------|--|
| α | Temperaturkoeffizient |
| Δ | Pulsbreite (ganzer Puls) |
| δ | Pulsbreite (halber Puls) |
| δ | Eindringtiefe |
| δ | Deltafunktion (Impuls) |
| ε | Rotorlage |
| η | Füllfaktor |
| γ | Korrekturfaktor (Strom-/Feldverdrängung) |
| γ | Ähnlichkeitsfaktor |

| | |
|-------------|----------------------------------|
| Λ | Skalierungsfaktor |
| λ | Pulshöhe |
| λ | Linearitätsfaktor |
| μ | Permeabilität |
| Ω | Kreisfrequenz |
| ω_0 | Kreisfrequenz (Grundschiwingung) |
| ω_r | Kreisfrequenz (Resonanzfall) |
| ω | Kreisfrequenz |
| Φ | Phasenwinkel |
| ϕ | Phasenwinkel |
| Ψ | Magnetischer Fluss |
| ψ | Magnetischer Fluss |
| σ | Konduktivität |
| σ | Sigmafunktion (Sprung) |
| τ | Pulslage |
| τ | Verschiebungsfaktor |
| ϑ | Temperatur |
| ξ^* | Verlustkoeffizient (modifiziert) |
| ξ | Verlustkoeffizient |

Lateinische Buchstaben

| | |
|-----------------|---|
| A | Querschnittsfläche |
| A | Amplitude |
| a | Reeller Fourierkoeffizient (Realteil) |
| B_r | Magnetische Flussdichte (Referenz) |
| B | Magnetische Flussdichte |
| b | Breite |
| b | Reeller Fourierkoeffizient (Imaginärteil) |
| \mathbb{C} | Menge komplexer Zahlen |
| C | Kapazität |
| c^* | Komplexer Fourierkoeffizient (konjugiert) |
| c | Komplexer Fourierkoeffizient |
| d | Dicke/Durchmesser |
| E_f | Spektralenergie |
| \mathcal{E}_f | Rechengenauigkeit (relativer Fehler) |

| | |
|----------------|--|
| e_m | Ansteuerverfahren |
| \mathfrak{F} | Fourier-Transformierte |
| f_0 | Frequenz (Grundschiwingung) |
| \tilde{f}_e | Elektrische Frequenz (modifiziert) |
| f_e | Elektrische Frequenz |
| f_r | Frequenz (Referenz) |
| \tilde{f}_s | Schaltfrequenz (modifiziert) |
| f_s | Schaltfrequenz |
| f | Frequenz |
| h | Höhe |
| \Im | Imaginärteil (Komplexe Zahl) |
| I | Stromamplitude (Frequenzbereich) |
| \hat{i} | Stromamplitude (Zeitbereich) |
| i | Laufvariable |
| i | Strom (Zeitbereich) |
| j | Laufvariable |
| j | Imaginäre Einheit |
| K | Ordnungszahl (Schalt-/Fensterfunktion) |
| k | Ordnung (Schalt-/Fensterfunktion) |
| L | Anzahl (Schaltpulse/-perioden) |
| L_s | Serieninduktivität |
| L | Induktivität |
| l | Länge |
| M | Ordnungszahl (Schaltfunktion) |
| M | Drehmoment |
| m_a | Modulationsgrad |
| m | Masse |
| m | Ordnung (Schaltfunktion) |
| N | Ordnungszahl (Fensterfunktion) |
| \mathbb{N} | Menge natürlicher Zahlen |
| N | Anzahl |
| n_p | Polpaarzahl |
| n_s | Nutzahl |
| n | Drehzahl |
| n | Ordnung (Fensterfunktion) |
| \mathcal{O} | Rechenaufwand (benötigte Ressourcen) |

| | |
|-------------------|--|
| P | Leistung |
| \mathbb{Q} | Menge rationaler Zahlen |
| Q | Speicherbedarf |
| \tilde{q} | Schaltverhältnis (modifiziert) |
| q | Schaltverhältnis |
| \Re | Realteil (Komplexe Zahl) |
| R_s | Serienwiderstand |
| \mathbb{R} | Menge reeller Zahlen |
| R | Widerstand |
| r_p | Verlustverhältnis |
| \bar{s} | Schaltzustand (gewichtet) |
| s^* | Schaltzustand (modifiziert) |
| s | Schaltzustand |
| T_0 | Periodendauer (Grundschiwingung) |
| T_e | Elektrische Periode |
| T | Periodendauer |
| T_s | Schaltperiode |
| t_l | Einschaltzeit (Transistor) |
| t_o | Ausschaltzeit (Transistor) |
| t | Zeit |
| U | Spannungsamplitude (Frequenzbereich) |
| $u_{\alpha\beta}$ | $\alpha\beta$ -Spannung |
| u_{dq} | dq -Spannung |
| \hat{u} | Spannungsamplitude (Zeitbereich) |
| u_p | Polradspannung |
| \vec{u} | Spannungszeiger |
| u_γ | Sternpunktspannung |
| u | Spannung (Zeitbereich) |
| w | Windungszahl |
| Y | Signal (Frequenzbereich) |
| y | Signal (Zeitbereich) |
| \mathbb{Z} | Menge ganzer Zahlen |
| Z | Impedanz |
| z | Anzahl (Leiter-/Blech-/Magnetsegmente) |
| z | Schalterkombination |