

---

# Berechnung von Drehstromnetzen

---

Bernd R. Oswald

# Berechnung von Drehstromnetzen

Berechnung stationärer  
und nichtstationärer Vorgänge  
mit Symmetrischen Komponenten  
und Raumzeigern

2., korrigierte und erweiterte Auflage

Mit 100 Abbildungen, 57 Tabellen  
und 32 durchgerechneten Beispielen

Prof. Dr.-Ing. habil. Bernd R. Oswald  
Leibniz Universität Hannover  
Deutschland

ISBN 978-3-8348-2620-6  
DOI 10.1007/978-3-8348-2621-3

ISBN 978-3-8348-2621-3 (eBook)

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 Fachmedien Wiesbaden 2009, 2013

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.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist eine Marke von Springer DE. Springer DE ist Teil der Fachverlagsgruppe Springer Science+Business Media.  
[www.springer-vieweg.de](http://www.springer-vieweg.de)

# Vorwort zur zweiten Auflage

Mit dem zunehmenden Ausbau von Erzeugern auf der Grundlage regenerativer Energien einerseits und der Stilllegung von konventionellen Kraftwerken andererseits ist eine Anpassung der Netze an die veränderten Kraftwerksstandorte und Leistungsflüsse dringend erforderlich. Allein für das deutsche Übertragungsnetz werden notwendige Leitungszubauten von mehreren tausend Kilometer Länge prognostiziert. Daneben bedarf es eines umfangreichen Ausbaus und einer grundlegenden Rekonstruktion der Verteilnetze, bis hin zu den sogenannten Smart Grids, die durch informationstechnische Vernetzung der dezentralen Erzeuger und Abnehmer in der Lage sein sollen, einen möglichst regionalen Leistungsausgleich herzustellen. Gleichzeitig steigen durch die schwankende Einspeisung aus Wind- und Solarenergieanlagen die Anforderungen an die Netzbetriebsführung zur Aufrechterhaltung der Versorgungssicherheit und Energiequalität. Da Speicher der erforderlichen Kapazität nicht zur Verfügung stehen, sind besondere unter dem Begriff Energiemanagement zusammengefasste Maßnahmen wie z. B. die Vorhaltung von schneller Regelleistung, Redispatch und Engpassmanagement notwendig.

Vor diesem Hintergrund sind Fragen der Netzberechnung nach wie vor aktuell. Auch wenn heute dafür leistungsfähige kommerzielle Computerprogramme zur Verfügung stehen, ist es dennoch wichtig, die zu Grunde liegenden mathematischen Modelle mit ihren Abstraktionen und Vereinfachungen zu kennen, um die Eingabedaten richtig aufzubereiten und die Ergebnisse kritisch bewerten zu können. Andererseits eröffnet die Kenntnis der mathematischen Modelle den Studierenden oder in der Praxis tätigen Ingenieuren die Möglichkeit, das ein oder andere spezielle Problem unter Nutzung beispielsweise von MATLAB selbst zu lösen, ohne aufwändigere Computerprogramme bemühen zu müssen. Als Beispiel hierfür sind im Anhang MATLAB-Files für die Leistungsfluss- und Kurzschlussstromberechnung angegeben.

Das vorliegende Buch enthält die wichtigsten Grundlagen der Berechnung von Drehstromnetzen in systematischer knotenorientierter Form (siehe das Vorwort zur ersten Auflage). Die Ausführungen sind durch zahlreiche durchgerechnete Beispiele ergänzt. Die zweite Auflage wurde um zwei Abschnitte zur Fehlerberechnung mit dem Überlagerungsverfahren sowie um ein Kapitel zur Netzzustandsschätzung erweitert. Damit wurde ein Bezug zu der insbesondere im Planungsstadium unentbehrlichen Kurzschlussstromberechnung nach den Normen IEC und DIN EN 60909-0 hergestellt, während die Kenntnis des Netzzustandes Voraussetzung ist für die Überwachung des Betriebszustandes sowie für präventive Ausfall- und Kurzschlussimulationen zur Gewährleistung eines sicheren Netzbetriebes auch bei unvorhersehbaren Störungen.

Der Verfasser dankt den aufmerksamen Lesern, die zur Beseitigung von Druckfehlern in der ersten Auflage beigetragen haben.

# Vorwort zur ersten Auflage

Die Netze der elektrischen Energieversorgung sind mit Ausnahme der Bahnstromversorgung und einiger weniger Hochspannungsgleichstrom-Übertragungen Drehstromnetze verschiedener Spannungsebenen.

Drehstromnetze weisen die Besonderheit auf, dass ihre Leiter induktiv, kapazitiv und resistiv gekoppelt sind, wodurch das Rechnen in Leiterkoordinaten erschwert wird.

Für symmetrisch aufgebaute Betriebsmittel kann durch eine parameterunabhängige Modaltransformation eine Entkopplung der so eingeführten modalen Größen oder Komponenten erzielt werden, die eine wesentliche Vereinfachung im Berechnungsablauf darstellt.

Der mathematische Hintergrund für die modalen Komponenten wird im 1. Kapitel dargelegt und es wird gezeigt, dass sich sämtliche gebräuchliche modale Komponenten auf eine einzige Transformationsmatrix zurückführen lassen.

Die am weitesten verbreitenden modalen Komponenten sind die Symmetrischen Komponenten. Sie stellen Zeigergrößen dar und werden in den Kapiteln 4, 5, 6 und 7 für die Berechnung stationärer und quasistationärer Vorgänge mit Grundschiebungsfrequenz verwendet.

Das Pendant zu den Symmetrischen Komponenten im Frequenzbereich sind im Zeitbereich die Raumzeigerkomponenten. Sie werden in den Kapiteln 8, 9 und 10 über die bisher bevorzugte Anwendung auf die Modelle der rotierenden elektrischen Maschinen hinaus vorteilhaft für die Berechnung von transienten Vorgängen im Drehstromnetz angewendet.

Während sich für die Berechnung stationärer und quasistationärer Vorgänge mit Zeigergrößen im Frequenzbereich das im Kapitel 3 beschriebene Knotenpunktverfahren (KPV) bestens bewährt hat, fehlte bisher ein ähnlich einfach zu handhabendes Rechenverfahren für die Berechnung von transienten Vorgängen im Zeitbereich.

Mit dem im 9. Kapitel vorgestellten Erweiterten Knotenpunktverfahren (EKPV) wird diese Lücke geschlossen. Das EKPV ermöglicht die Aufstellung eines Netzgleichungssystems in Form eines Algebro-Differentialgleichungssystems ausschließlich unter Verwendung der Knotenpunktsätze analog zum gewöhnlichen KPV. Das Algebro-Differentialgleichungssystem kann in ein reines Differentialgleichungs-System überführt werden, anhand dessen auch die Berechnung der Netzeigenwerte möglich ist, ohne das mühselige Aufstellen des vollständigen Zustandsdifferential-Gleichungssystems mit Hilfe von Knotenpunkt- und Maschensätzen vornehmen zu müssen.

Im Hinblick auf das KPV und das EKPV werden die mathematischen Modelle der Betriebsmittel (Generatoren, Transformatoren, Leitungen (Kabel und Freileitungen), Motoren und sonstige Abnehmer) in einheitlicher systematischer Darstellung durch Stromgleichungen für die Berechnung sowohl im Frequenz- als auch im Zeitbereich in den Kapiteln 2 und 8 hergeleitet.

Für die Berechnung von Fehlern (Kurzschlüsse und Unterbrechungen) wird im Kapitel 6 mit dem Fehlermatrizenverfahren (FMV) ein äußerst einfacher einheitlicher Algorithmus für alle Fehlerkonstellationen (Einfach- und Mehrfachfehler in beliebiger Kombination) vorgestellt, der sowohl auf das Knotenspannungs-Gleichungssystem des KPV als auch das Algebro-Differentialgleichungssystem des EKPV angewendet werden kann. Auf die Beschreibung der speziellen Verfahren zur Kurzschlussstromberechnung nach den Normen DIN VDE 0102 und

IEC 60909 wurde dagegen bewusst verzichtet, da diese im Buch Oeding/Oswald „Elektrische Kraftwerke und Netze“ /3/ ausführlich dargelegt sind.

Das Buch ist entstanden aus Vorlesungen zur Netzberechnung, die ich an der TU Dresden, der TH Leipzig, der Universität Rostock und der Universität Hannover gehalten und im Laufe der Zeit inhaltlich immer stärker auf eine systematische knotenorientierte Betrachtungsweise ausgerichtet habe. Dabei sind fast selbstverständlich das EKPV und das FMV entstanden. Für das Studium des Buches werden die Grundlagen der Elektrotechnik, insbesondere die komplexe Rechnung und die Grundzüge der Matrizenrechnung, die sich in ihrer kompakten Form für die verkürzte Beschreibung von Drehstromnetzen besonders anbietet, vorausgesetzt. Um die Beispielrechnungen nachvollziehen zu können, sind Grundkenntnisse von MATLAB nützlich.

Abschließend ist es mir ein Bedürfnis, an dieser Stelle allen meinen früheren Assistenten und Doktoranden, denen ich nicht nur Betreuer sein durfte, sondern von denen ich auch eine Vielzahl von Anregungen erhalten habe, herzlich für die Bereicherung meines Berufslebens, in dem ich mich glücklicherweise zum größten Teil der Forschung und Lehre widmen konnte, zu danken.

Hannover 2008

B. R. Oswald

# Inhaltsverzeichnis

|          |  |     |
|----------|--|-----|
| <b>1</b> | <b>Symmetrische Komponenten und Raumzeiger</b> .....                         | 1   |
| 1.1      | Modaltransformation .....  | 1   |
| 1.2      | Symmetrische Komponenten .....   | 6   |
| 1.3      | Raumzeiger .....   | 9   |
| 1.3.1    | Raumzeigerkomponenten in ruhenden Koordinaten .....                          | 9   |
| 1.3.2    | Raumzeigerkomponenten in rotierenden Koordinaten .....                       | 12  |
| 1.4      | Zusammenhang zwischen Raumzeiger und Zeiger .....                            | 15  |
| <b>2</b> | <b>Betriebsmittelgleichungen in Symmetrischen Komponenten</b> .....          | 19  |
| 2.1      | Leitungen .....  | 19  |
| 2.2      | Transformatoren .....  | 27  |
| 2.2.1    | Beziehungen zwischen den Wicklungsgrößen .....                               | 27  |
| 2.2.2    | Beziehungen zwischen den Wicklungs- und Klemmengrößen .....                  | 30  |
| 2.2.3    | Ersatzschaltungen für die Symmetrischen Komponenten .....                    | 35  |
| 2.2.4    | Stromgleichungen für die Symmetrischen Komponenten<br>ohne Übertrager .....  | 43  |
| 2.2.5    | Bestimmung der Ersatzschaltungsparameter .....                               | 50  |
| 2.3      | Generatoren, Motoren und Ersatznetze .....                                   | 50  |
| 2.4      | Nichtmotorische Lasten .....   | 54  |
| <b>3</b> | <b>Netzgleichungssysteme in Symmetrischen Komponenten</b> .....              | 57  |
| 3.1      | Zusammengefasste Darstellung der Betriebsmittelgleichungen .....             | 57  |
| 3.2      | Knotenspannungs-Gleichungssysteme .....                                      | 59  |
| 3.2.1    | Gleichungssystem für die Berechnung von Fehlern und<br>der Netzdynamik ..... | 60  |
| 3.2.2    | Gleichungssystem für die Leistungsflussberechnung .....                      | 64  |
| <b>4</b> | <b>Leistungsflussberechnung</b> .....  | 67  |
| 4.1      | Knotenspezifikation .....  | 67  |
| 4.2      | Knotenpunktverfahren .....   | 68  |
| 4.3      | Newtonverfahren .....  | 70  |
| <b>5</b> | <b>Berechnung von Einfach- und Doppelfehlern</b> .....                       | 77  |
| 5.1      | Fehlerarten .....  | 77  |
| 5.2      | Fehlerbedingungen .....  | 78  |
| 5.3      | Fehlerbedingungen in Symmetrischen Komponenten .....                         | 81  |
| 5.4      | Berechnung von Einfachquerfehlern .....                                      | 91  |
| 5.4.1    | Dreipoliger Kurzschluss mit und ohne Erdberührung .....                      | 97  |
| 5.4.2    | Einpoliger Erdkurzschluss oder Erdschluss .....                              | 98  |
| 5.4.3    | Zweipoliger Kurzschluss mit Erdberührung .....                               | 100 |
| 5.4.4    | Zweipoliger Kurzschluss ohne Erdberührung .....                              | 102 |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.5      | Berechnung von Einfachlängsfehlern .....   | 104        |
| 5.5.1    | Dreipolige Unterbrechung .....   | 107        |
| 5.5.2    | Zweipolige Unterbrechung .....   | 108        |
| 5.5.3    | Einpolige Unterbrechung .....  | 110        |
| 5.6      | Berechnung von Doppelfehlern .....   | 113        |
| 5.7      | Überlagerungsverfahren .....   | 119        |
| 5.7.1    | Berechnung von Kurzschlüssen nach dem Überlagerungsverfahren .....   | 120        |
| 5.7.2    | Berechnung von Unterbrechungen nach dem Überlagerungsverfahren ...   | 128        |
| <b>6</b> | <b>Fehlermatrizenverfahren</b> .....   | <b>135</b> |
| 6.1      | Fehlermatrizen .....   | 135        |
| 6.2      | Fehlermatrizen in Symmetrischen Komponenten .....  | 138        |
| 6.3      | Nachbildung von Kurzschlüssen an der Knotenadmittanzmatrix .....   | 142        |
| 6.4      | Nachbildung von Kurzschlüssen an der Knotenimpedanzmatrix .....  | 150        |
| 6.5      | Nachbildung von Kurzschlüssen auf Leitungen .....  | 152        |
| 6.6      | Abschalten von Leitungen und Transformatoren .....   | 155        |
| 6.7      | Abschalten von kurzschlussbehafteten Leitungen .....   | 161        |
| 6.8      | Abschalten von Generatoren, Motoren und Lasten .....   | 161        |
| 6.9      | Berücksichtigung von Unsymmetriezuständen .....  | 162        |
| 6.10     | Zusammenfassung des Berechnungsablaufs .....   | 167        |
| 6.11     | Anwendung des Fehlermatrizenverfahrens zur Kurzschlussstromberechnung<br>nach IEC und DIN EN 60909-0 ..... | 168        |
| <b>7</b> | <b>Berechnung quasistationärer Vorgänge</b> .....  | <b>175</b> |
| 7.1      | Algebro-Differentialgleichungssystem .....   | 175        |
| 7.1.1    | Netzgleichungen .....  | 176        |
| 7.1.2    | Differentialgleichungen der Generatoren .....  | 177        |
| 7.1.3    | Differentialgleichungen der Motoren .....  | 177        |
| 7.2      | Berechnung der transienten Stabilität .....  | 179        |
| <b>8</b> | <b>Betriebsmittelgleichungen in Raumzeigerkomponenten</b> .....  | <b>193</b> |
| 8.1      | Allgemeine Formen .....  | 193        |
| 8.2      | Leitungen .....  | 199        |
| 8.2.1    | Gleichungen der induktiven und kapazitiven Leitungsabschnitte .....  | 199        |
| 8.2.2    | Leitungsmodell ohne Querglieder .....  | 201        |
| 8.2.3    | Leitungsmodell als T-Glied .....   | 203        |
| 8.2.4    | Leitungsmodell als T-Kettenschaltung .....   | 204        |
| 8.2.5    | Leitungsmodell als $\Pi$ -Glied .....  | 205        |
| 8.2.6    | Leitungsmodell als $\Pi$ -Kettenschaltung .....  | 206        |
| 8.2.7    | Anfangswerte für die Zustandsgrößen .....  | 207        |
| 8.3      | Transformatoren .....  | 208        |
| 8.3.1    | Zustandsgleichungen des Einphasentransformators .....  | 209        |
| 8.3.2    | Zustandsgleichungen für die Wicklungsgrößen<br>der Drehstromtransformatoren .....                          | 209        |
| 8.3.3    | Beziehungen zwischen den Wicklungs- und Klemmengrößen .....  | 211        |



|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 8.3.4     | Zustandsgleichungen und modifizierte Stromgleichungen für die Schaltgruppen Yy0, Yd5 und Dy5 ..... | 213        |
| 8.3.5     | Anfangswerte für die Zustandsvariablen .....   | 218        |
| 8.4       | Synchrongeneratoren .....  | 219        |
| 8.4.1     | Gleichungssystem in dq0-Koordinaten .....  | 219        |
| 8.4.2     | Transientes Modell mit Raumzeigern für die Ständergrößen .....                                     | 221        |
| 8.4.3     | Anfangswerte für die Zustandsgrößen .....  | 226        |
| 8.4.4     | Quasistationäres Modell mit subtransienter Spannung .....  | 227        |
| 8.4.5     | Quasistationäres Modell mit konstanter transienter Spannung .....                                  | 234        |
| 8.4.6     | Stationäres Modell mit Polradspannung .....  | 236        |
| 8.4.7     | Berechnung der Modellparameter aus den Maschinenparametern .....                                   | 237        |
| 8.5       | Asynchronmaschinen .....   | 239        |
| 8.5.1     | Allgemeines Gleichungssystem mit Raumzeigern .....   | 240        |
| 8.5.2     | Transientes Modell mit Raumzeigern in Ständerkoordinaten .....                                     | 240        |
| 8.5.3     | Anfangswerte für die Raumzeiger .....  | 242        |
| 8.5.4     | Quasistationäres Modell mit transienter Spannung .....   | 243        |
| 8.5.5     | Stationäres Modell .....   | 245        |
| 8.5.6     | Berechnung der Modellparameter aus den Maschinendaten .....  | 248        |
| 8.6       | Nichtmotorische Lasten .....   | 249        |
| <b>9</b>  | <b>Erweitertes Knotenpunktverfahren</b> .....  | <b>255</b> |
| 9.1       | Klemmgleichungen der Betriebsmittel .....  | 255        |
| 9.2       | Knotenspezifikation und Knotenpunktsätze .....   | 256        |
| 9.3       | Netzgleichungssysteme des EKPV .....   | 257        |
| 9.3.1     | Gleichungssystem für ein L-C-Netz .....  | 261        |
| 9.3.2     | Gleichungssystem für ein L-Netz .....  | 266        |
| 9.3.3     | Gleichungssystem für ein C-Netz .....  | 270        |
| 9.4       | Berechnung der Netzeigenwerte nach dem EKPV .....  | 270        |
| <b>10</b> | <b>Fehlermatrizenverfahren in Raumzeigerkomponenten</b> .....                                      | <b>275</b> |
| 10.1      | Fehlerbedingungen und Fehlermatrizen .....   | 275        |
| 10.2      | Nachbildung von Kurzschlüssen an L- und R-Knoten .....   | 277        |
| 10.3      | Nachbildung von Kurzschlüssen an C-Knoten .....  | 286        |
| 10.4      | Nachbildung von Unterbrechungen an Betriebsmitteln .....   | 290        |
| <b>11</b> | <b>Netzzustandsschätzung</b> .....   | <b>295</b> |
| 11.1      | Messwerte und Messfehler .....   | 296        |
| 11.3      | Messmodell .....   | 299        |
| A.1       | MATLAB-Programm Leistungsflussberechnung .....   | 307        |
| A.2       | MATLAB-Programm Fehlermatrizenverfahren .....  | 311        |
| A.3       | Ergänzung zu den Fehlermatrizen .....  | 315        |
|           | Formelzeichen und Nebenzeichen .....   | 318        |
|           | Literatur .....  | 321        |
|           | Sachwortverzeichnis .....  | 322        |