Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis xiii
Tabellenverzeichnis xvii
Abkürzungsverzeichnis xix
Symbolverzeichnis xxi

1. Einleitung 1
1.1. Notwendigkeit transienter Simulationen am Beispiel von Elektroenergiesystemen .......................... 1
1.2. Bekannte Ansätze zur Steigerung der Recheneffizienz ......................... 2
1.2.1. Ordnungsreduktion ........................................ 2
1.2.2. Behandlung gekoppelter Systeme ................................ 5
1.2.3. Simulationswerkzeuge ...................................... 6
1.3. Ziele der vorliegenden Arbeit ..................................... 6
1.4. Abgrenzung der durchgeführten Betrachtungen ............................... 7
1.5. Aufbau der Arbeit ............................................... 8

2. Ordnungsreduktion linearer Systeme 11
2.1. Allgemeines zur projektiven Ordnungsreduktion .......................... 12
2.2. Modale Ordnungsreduktion ..................................... 15
2.2.1. Transformationsschritt .................................... 15
2.2.2. Reduktionsschritt .......................................... 15
2.2.3. Verfahrensvarianten ....................................... 16
2.3. Balanciertes Abschneiden ...................................... 17
2.3.1. Transformationsschritt .................................... 17
2.3.2. Reduktionsschritt .......................................... 19
2.3.3. Verfahrensvarianten ....................................... 19
2.4. Krylov-Unterraummethoden .................................... 20
2.4.1. Übertragungsfunktion und deren Momente ........................ 20
2.4.2. Reduziertes System im Krylov-Unterraum ........................ 22
2.4.3. Berechnungsmethoden und Verfahrensvarianten ....................... 23
2.5. Komplexitätsreduktion unter Beibehaltung originaler Zustandskoordinaten 26
3. Ordnungsreduktion nichtlinearer Systeme
  3.1. Herausforderungen bei der Reduktion nichtlinearer Systeme ........... 30
    3.1.1. Ermittlung eines dimensionsreduzierten Unterraumes .......... 31
    3.1.2. Behandlung der Nichtlinearität .......................... 32
  3.2. TPWL-basierte Ordnungsreduktion ............................. 34
    3.2.1. TPWL-Approximation des Originalsystems .................. 35
    3.2.2. Auswahl der Linearisierungspunkte ........................ 36
    3.2.3. Gewichtung der Teilsysteme ................................ 37
    3.2.4. Ordnungsreduktion der TPWL-Approximation ............... 39
    3.2.5. Komplexitätsreduktion der TPWL-Approximation ............. 40

4. Beschreibung gekoppelter Systeme .................................. 41
  4.1. Anforderungen an die Beschreibung gekoppelter Systeme ............ 42
  4.2. Kopplung durch Eingangs-Ausgangs-Substitution nach Hermann ...... 43
    4.2.1. Teilsystemdefinition und Systemtupelschreibweise .......... 43
    4.2.2. Kopplung von Teilsystemen ................................ 44
    4.2.3. Fazit ............................................... 51
  4.3. Verbindungsformalismus nach Michel ............................... 51
    4.3.1. Teilsystemdefinition .................................. 52
    4.3.2. Kopplung von Teilsystemen ................................ 52
    4.3.3. Fazit ............................................... 53
  4.4. Komponentenverbindungsmodell (CCM) ............................... 55
    4.4.1. Teilsystemdefinition (Komponenten) ......................... 56
    4.4.2. Komponentenverbund .................................... 56
    4.4.3. Verbundene Komponente und Verbindungsgleichung ............. 57
    4.4.4. Auflösung der CCM-Struktur ................................ 59
    4.4.5. Illustrationsbeispiel ................................... 61
    4.4.6. Fazit ............................................... 63
  4.5. Modifiziertes Komponentenverbindungsmodell (mCCM) ................ 64
    4.5.1. Komponentendefinition und Komponentenverbund .............. 65
    4.5.2. Verbundene Komponente und Verbindungsgleichung ............. 66
    4.5.3. Hierarchisch verbundene Komponente ......................... 69
    4.5.4. Auswertung der Komponentenfunktionen ....................... 71
    4.5.5. Illustrationsbeispiel ................................... 80
    4.5.6. Fazit ............................................... 81

5. Ordnungsreduktion im mCCM-Kontext .................................. 83
  5.1. Teilsystemreduktion .......................................... 83
  5.2. Erzwingung reduzierbarer Systemstrukturen ....................... 84
  5.3. Effiziente Erzeugung von TPWL-Approximationen ................... 85
    5.3.1. Trainingstrajectorie ................................... 85
    5.3.2. Systemmatrizen ........................................ 85
6. CoSimMA – eine mCCM–basierte modulare Simulationsumgebung 87
  6.1. Objektorientierte Programmierung als Mittel der Wahl .......... 87
  6.2. Objektorientierte Interpretation des mCCM .......................... 88
  6.3. Weitere Simulatormodule ............................................ 89
7. Anwendungsbeispiel 91
  7.1. Elektroenergiesystem als hierarchisch gekoppeltes System ........ 91
  7.2. Hierarchischer Aufbau des Beispielsystems ........................... 93
    7.2.1. Synchrongeneratormodell mit Reglern ......................... 93
    7.2.2. Leitungs-, Transformator- und Lastmodelle .................... 95
    7.2.3. Leistungsfloss- und Anfangswertberechnung ..................... 96
  7.3. Simulationsszenario .................................................. 98
  7.4. Simulationen mit reduzierten Modellen .............................. 100
    7.4.1. Linearisiertes Gesamtmodell ................................. 100
    7.4.2. Reduktion eines linearen Teilsystems ......................... 101
    7.4.3. TPWL-Approximation des Gesamtsystems ....................... 103
    7.4.4. Ordnungsreduktion der TPWL-Approximation .................... 106
    7.4.5. Komplexitätsreduktion der TPWL-Approximation ................. 107
  7.5. Abschließender Vergleich und Fazit ................................ 110
8. Zusammenfassung und Ausblick 113
  8.1. Zusammenfassung wesentlicher Ergebnisse .......................... 113
  8.2. Möglichkeiten weiterführender Forschung .......................... 115
A. Ergänzungen zur linearen Ordnungsreduktion 117
  A.1. Zur Berechnung der Systemmatrizen bei der Residualisierung .... 117
  A.2. Zum Begriff der projektiven Ordnungsreduktion .................... 119
  A.3. Zum Transformationsverhalten Gramscher Steuer- und Beobachtbarkeits-
       matrizen ............................................................. 122
  A.5. Zur Darstellung projizierter Zustandsraummodelle ................ 125
B. Kartesisches Produkt von Systemtupeln und Funktionen 127
C. Behandlung allgemeinerer Komponententypen im mCCM 131
D. Ergänzende Dokumentation zum Anwendungsbeispiel 133
  D.1. Normiertes Einheitensystem ........................................ 133
    D.1.1. Basisgrößen ................................................... 133
    D.1.2. Abgeleitete Bezugsgrößen .................................... 133
    D.1.3. Wechsel der Bezugsgrößen .................................... 133
    D.1.4. Verwendete Bezugsgrößen für das Anwendungsbeispiel ........ 134
  D.2. Betriebsmittelmodelle .............................................. 135
    D.2.1. Synchrongenerator .............................................. 135
D.2.2. Regler .................................................. 144
D.3. Dokumentation zu den durchgeführten Simulationsrechnungen ...... 151
   D.3.1. Rechner ............................................. 151
   D.3.2. Software .......................................... 151
   D.3.3. ODE-Löser ........................................ 151
   D.3.4. Bestimmung der Rechenzeiten ...................... 151

Literaturverzeichnis ........................................... 153
Publikationen ................................................ 169
Betreute studentische Arbeiten ................................ 173
Lebenslauf ...................................................... 175