

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	29
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	68
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. Trainingstrajektorie	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. Leistungsfluss- 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.4. Zur Berechnung der Momente einer Übertragungsfunktion	123
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