

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis..... v

Tabellenverzeichnis xiii

Listingsverzeichnis..... xvii

1 Einleitung 1

 1.1 Einführung 1

 1.2 Motivation und Zielsetzung der vorliegenden Arbeit 2

2 Stand des Wissens 5

 2.1 Klassifizierung von Modellen 5

 2.2 Mathematische Modelle..... 6

 2.3 Mathematische Modelle in der Verfahrenstechnik..... 8

 2.3.1 Empirische und phänomenologische Modelle 9

 2.3.2 Stochastische und deterministische Modelle 9

 2.3.3 Konzentrierte und verteilte Parametermodelle 10

 2.3.4 Kontinuierliche und diskrete Modelle 10

 2.4 Struktur mathematischer Modelle 10

 2.5 Lösung gekoppelter mathematischer Modelle 11

 2.5.1 Explizite Kopplung durch Gauss-Seidel-Verfahren 14

 2.5.2 Explizite Kopplung durch Jacobi-Verfahren 15

 2.5.3 Implizite Kopplung durch Waveformrelaxation 15

 2.5.4 Numerische Stabilität bei schwacher Kopplung 18

 2.6 Aufgabenstellung 19

3 Implementierung der Co-Simulation..... 21

 3.1 Hinweise zu Diagrammen, Zahlenformat und Einheitensystem 21

 3.2 Der ideal durchmischte Rührkesselreaktor als Beispiel..... 22

 3.2.1 Modellgleichungen..... 23

 3.2.2 Parameter und Variablen 25

 3.3 Lösung des monolithischen Modells 26

 3.4 Entkopplung der Teilmodelle..... 28

 3.5 Konvergenzbewertung..... 31

 3.6 Gauss-Seidel-Waveformrelaxation 36

 3.6.1 Iterative Lösung des Beispielsystems 36

- 3.6.2 Gauss-Seidel-Waveformrelaxation ohne Segmentierung.....39
 - 3.6.3 Gauss-Seidel-Waveformrelaxation mit Segmentierung.....43
 - 3.6.4 Verbesserung der Genauigkeit50
 - 3.6.4.1 Verkleinerung der ε -Umgebung50
 - 3.6.4.2 Erhöhung der Anzahl an Stützstellen pro Segment52
 - 3.6.4.3 Erhöhung der Anzahl an Segmenten.....54
 - 3.6.4.4 Kombination der Maßnahmen.....56
- 3.7 Jacobi-Waveformrelaxation58
 - 3.7.1 Jacobi-Waveformrelaxation ohne Segmentierung.....58
 - 3.7.2 Jacobi-Waveformrelaxation mit Segmentierung62
 - 3.7.3 Verbesserung der Genauigkeit66
 - 3.7.3.1 Verkleinerung der ε -Umgebung66
 - 3.7.3.2 Erhöhung der Anzahl an Stützstellen pro Segment68
 - 3.7.3.3 Erhöhung der Anzahl an Segmenten.....70
 - 3.7.3.4 Kombination der Maßnahmen72
- 3.8 Benchmark der untersuchten Verfahren74
- 4 Verallgemeinerung des Ansatzes79**
 - 4.1 Adaptive Segmentierung79
 - 4.2 Semantische Analyse der Fließbildtopologie89
 - 4.2.1 Zusammenhang des Graphen.....90
 - 4.2.2 Reihenfolge der Subsystemauswertung92
- 5 Anwendungsbeispiel95**
 - 5.1 Beschreibung des Referenzsystems95
 - 5.2 Wärmeübertrager96
 - 5.2.1 Modellgleichungen96
 - 5.2.2 Parameter und Variablen.....100
 - 5.3 Pumpe.....101
 - 5.3.1 Modellgleichungen101
 - 5.3.2 Parameter und Variablen.....102
 - 5.4 Vorlagebehälter102
 - 5.4.1 Modellgleichungen103
 - 5.4.2 Parameter und Variablen.....103
 - 5.5 Regler.....103
 - 5.5.1 Modellgleichungen des PID-Reglers104
 - 5.5.2 Modellgleichungen des Zweipunktreglers106
 - 5.5.3 Parameter und Variablen.....106

5.6	Messeinrichtungen	107
5.6.1	Modellgleichungen.....	107
5.6.2	Parameter und Variablen	107
5.7	Quellen und Senken	108
5.7.1	Parameter und Variablen	108
5.8	Analyse des Fließbildes.....	109
5.9	Orchestrierung der Co-Simulationsumgebung	110
6	Ergebnisse und Diskussion	115
6.1	Gauss-Seidel-Waveformrelaxation für das Referenzsystem.....	115
6.2	Validierung anhand des monolithischen Modells.....	117
6.3	Bewertung	120
7	Architektur eines skalierbaren Co-Simulationsframeworks	125
7.1	Serverless Computing	125
7.2	Servicemodelle.....	126
7.3	Model as a Service	128
8	Zusammenfassung und Ausblick.....	131
8.1	Zusammenfassung.....	131
8.2	Ausblick	132
9	Symbolverzeichnis	135
9.1	Lateinische Symbole.....	135
9.2	Griechische Symbole und Operatoren.....	137
9.3	Indizes.....	137
10	Literatur.....	139
11	Appendix A	145
12	Appendix B.....	147
12.1	Freie oder Open-Source-Programme.....	147
12.2	Kommerzielle Programme	148
13	Appendix C.....	151
14	Appendix D	155
	Publikationsliste.....	165
	Lebenslauf	167