

Inhaltsverzeichnis

Vorwort 5

Zusammenfassung und Abstract 7

1. Einleitung 13

1.1. Motivation 13

1.2. Einordnung der Kopplungsverfahren 13

1.3. Ziele dieser Arbeit 15

I. Co-Simulation 17

2. Theorie der Co-Simulation 17

2.1. Einleitung 17

2.2. Testmodell: *Zweimassenschwinger* 18

2.3. Kopplungstopologien 20

2.3.1. Kraft-Weg Kopplung 20

2.3.2. Weg-Weg Kopplung 22

2.3.3. Kraft-Kraft Kopplung 22

2.3.4. *Constraint* Kopplung 22

2.4. Co-Simulationsverfahren 23

2.4.1. Ablauf des Datenaustausches 23

2.4.1.1. Ablauf des *Gauß-Seidel* Typs 24

2.4.1.2. Ablauf des *Jacobi* Typs 25

2.4.2. Wahl der Makroschrittweite 25

2.4.2.1. Feste Makroschrittweite 26

2.4.2.2. *Gauß-Seidel* Typ im Master/Slave Modus 26

2.4.2.3. *Jacobi* Typ mit Prädiktor/Korrektor Makroschritensteuerung 26

2.4.3. Approximation der Koppelgrößen 28

2.4.4. Anlaufrechnung 29

2.4.5. Einschränkungen kommerzieller Solver 29

2.5. Bewertungskriterien für die Co-Simulationsverfahren 30

2.5.1. Numerische Stabilität 31

2.5.2. Bewertung des numerischen Fehlers 31

2.5.2.1. Referenzlösung 31

2.5.2.2. Fehlermaß 32

2.5.2.3. Variablen für die Berechnung des numerischen Fehlers 33

2.5.2.4. Anlaufrechnung 33

2.5.3. Bewertung der numerischen Effizienz 34

2.6. Analyse der Co-Simulationsverfahren 34

2.6.1. Analyse der numerischen Stabilität der Co-Simulationsverfahren 34

2.6.2.	Numerische Fehleranalyse der Co-Simulationsverfahren	35
2.6.2.1.	Idealfall mit analytisch berechneten Anfangswerten	35
2.6.2.2.	Einfluss der Anlaufrechnung	40
2.6.2.3.	Einfluss der Subsystemsolver	42
2.6.2.4.	Fazit für die numerische Fehleranalyse	43
2.6.3.	Analyse der numerischen Effizienz der Co-Simulationsverfahren	44
2.6.3.1.	Rechenzeiten bei der Co-Simulation des Zweimassenschwingers	44
2.6.3.2.	Fazit für die Analyse der numerischen Effizienz	46
2.6.3.3.	Rechenzeiten komplexer, multiphysikalischer Modelle	47
3.	Co-Simulation komplexer multiphysikalischer Systeme	49
3.1.	MKS - Hydraulik	49
3.1.1.	Gleichungen des MKS-Submodells	49
3.1.2.	Gleichungen des hydraulischen Submodells	50
3.1.3.	Testmodell: <i>Zweimassenschwinger</i>	50
3.1.4.	Anwendung: Hochdruckpumpe (Common-Rail-Einspritzsystem)	51
3.1.4.1.	Common-Rail-Einspritzsystem	51
3.1.4.2.	MKS-Subsystem der Hochdruckpumpe	52
3.1.4.3.	Hydraulisches Subsystem der Hochdruckpumpe	53
3.1.4.4.	Kopplung der Hochdruckpumpensubsysteme	54
3.1.4.5.	Simulationsergebnisse der Hochdruckpumpe	55
3.1.4.6.	Konvergenz der Co-Simulationsergebnisse der Hochdruckpumpe	59
3.1.4.7.	Fazit für die Co-Simulation der Hochdruckpumpe	63
3.2.	MKS - Elektrodynamik	65
3.2.1.	Gleichungen des elektrodynamischen Submodells	65
3.2.2.	Testmodell: <i>Zweimassenschwinger</i>	67
3.2.3.	Anwendung: <i>Thomson Spule</i>	68
3.2.3.1.	Aufbau und Funktionsprinzip der <i>Thomson Spule</i>	68
3.2.3.2.	Subsysteme und Kopplung der <i>Thomson Spule</i>	69
3.2.3.3.	Konvergenz der Co-Simulationsergebnisse der <i>Thomson Spule</i>	70
3.2.3.4.	Simulationsergebnisse der <i>Thomson Spule</i>	71
3.2.3.5.	Fazit für die Co-Simulation der <i>Thomson Spule</i>	72
3.2.4.	Anwendung: <i>Recloser</i>	73
3.2.4.1.	Aufbau und Funktionsprinzip des <i>Reclosers</i>	73
3.2.4.2.	Subsysteme und Kopplung des <i>Reclosers</i>	74
3.2.4.3.	Konvergenz der Co-Simulationsergebnisse des <i>Reclosers</i>	75
3.2.4.4.	Co-Simulationsergebnisse des <i>Reclosers</i>	77
3.2.4.5.	Fazit für die Co-Simulation des <i>Reclosers</i>	80
3.3.	MKS - FE-Strukturdynamik	81
3.3.1.	Nichtlineare, dynamische FE-Gleichungen	81
3.3.2.	Topologien für die Kopplung von MKS und FE-Strukturdynamik	81
3.3.2.1.	Kraftrandbedingungen	81
3.3.2.2.	Verschiebungsrandbedingungen	82

3.3.3.	Testmodell: <i>Einmassenschwinger - eindimensionaler FE-Dehnstab</i>	84
3.3.3.1.	Parameter	84
3.3.3.2.	Zeitverlauf	85
3.3.3.3.	Konvergenz der Co-Simulationsergebnisse	85
3.3.3.4.	Rechenzeiten	86
3.3.4.	Anwendung: Fallturm	87
3.3.4.1.	Aufbau und Funktion des Fallturms	87
3.3.4.2.	Subsysteme und Kopplung des Fallturms	88
3.3.4.3.	Co-Simulationsergebnisse des Fallturms	89
3.3.4.4.	Fazit für die Co-Simulation des Fallturms	90
3.3.5.	Anwendung: <i>Recloser</i>	90
3.3.5.1.	Subsysteme und Kopplung des <i>Reclosers</i>	91
3.3.5.2.	Co-Simulationsergebnisse des <i>Reclosers</i>	92
3.3.5.3.	Fazit für die Co-Simulation des <i>Reclosers</i>	93
II.	Solverkopplung	95
4.	Theorie der dynamisch-statischen Solverkopplung	95
4.1.	Kopplungstopologie für die dynamisch-statische Solverkopplung	95
4.2.	Kopplungsverfahren für die dynamisch-statische Solverkopplung	95
4.2.1.	Lösung des dynamischen Subsystems	96
4.2.2.	Lösung des statischen Subsystems	98
4.2.3.	Kopplungsverfahren	98
4.2.3.1.	Voll-implizite Kopplung	99
4.2.3.2.	Semi-implizite Kopplung	99
4.3.	Testmodell: <i>nichtlinearer Einmassenschwinger</i>	100
4.4.	Analyse der dynamisch-statischen Solverkopplungsverfahren	102
4.4.1.	Numerische Fehleranalyse der Solverkopplungsverfahren	102
4.4.2.	Analyse der numerischen Effizienz der Solverkopplungsverfahren	103
4.4.3.	Fazit für die Analyse der Solverkopplungsverfahren	105
5.	Solverkopplung komplexer multiphysikalischer Systeme	107
5.1.	MKS - FEM (quasi-statisch), Anwendung: Rotor mit Gleitlager	107
5.1.1.	MKS-Subsystem: Rotor	107
5.1.2.	FEM-Subsystem: Gleitlager	108
5.1.3.	Kopplung des Rotors mit dem Gleitlager	109
5.1.4.	Vergleich der Solverkopplungsverfahren am Modell des Rotors mit Gleitlager	110
5.1.5.	Fazit für die Solverkopplung des Rotors mit Gleitlager	114
	Fazit	115
6.	Ergebnisse und Diskussion	115
6.1.	Co-Simulation	115

6.2. Dynamisch-statische Solverkopplung	116
6.3. Fazit	117
Anhang	119
A. Schnittstellen und Beispiele	119
A.1. Verfügbare Schnittstellen	119
A.2. Beispiele für gekoppelte Modelle	120
B. Veröffentlichungen zu dieser Arbeit	123
C. Software	125
C.1. Explizite <i>Runge-Kutta</i> Verfahren	125
C.2. Adams	127
C.3. <i>DSHplus</i>	128
C.4. Comsol	128
C.5. Abaqus	129
D. Implementierung	131
D.1. Implementierung der Co-Simulation	131
D.2. Implementierung der dynamisch-statischen Solverkopplung	133
Literatur	135
Glossar	149
Abkürzungsverzeichnis	149
Formelzeichen	150