

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: <i>Zweimassenschwinger</i>	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. <i>Constraint</i> Kopplung	22
2.4. Co-Simulationsverfahren	23
2.4.1. Ablauf des Datenaustausches	23
2.4.1.1. Ablauf des <i>Gauß-Seidel</i> Typs	24
2.4.1.2. Ablauf des <i>Jacobi</i> Typs	25
2.4.2. Wahl der Makroschrittweite	25
2.4.2.1. Feste Makroschrittweite	26
2.4.2.2. <i>Gauß-Seidel</i> Typ im Master/Slave Modus	26
2.4.2.3. <i>Jacobi</i> Typ mit Prädiktor/Korrektor Makroschrittweitensteuerung	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>Reclosers</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</i> - eindimensionaler FE-Dehnstab	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 Runge-Kutta Verfahren	125
C.2. Adams	127
C.3. DSHplus	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