

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vii
Abkürzungsverzeichnis	xi
Wichtige Formelzeichen	xiii
1 Einführung	1
1.1 Herausforderung Selbstoptimierung	1
1.2 Umfeld dieser Arbeit	2
1.2.1 Sonderforschungsbereich 614	3
1.2.2 Neue Bahntechnik Paderborn	6
1.3 Zielsetzung	8
1.4 Gliederung der Arbeit	9
2 Grundlagen für die Entwicklung selbstoptimierender Systeme	11
2.1 Bestimmung des Begriffs Selbstoptimierung	11
2.1.1 Adaptive Regler und Selbstoptimierung	11
2.1.2 Definition der Selbstoptimierung	14
2.2 Optimierungs- und Lernverfahren	16
2.2.1 Modellbasierte Verfahren	18
2.2.2 Modellbasierte Optimierung	18
2.2.3 Verhaltensbasierte Verfahren	22
2.2.4 Lernverfahren – Grundlagen	25
2.2.5 Selbstverstärkendes Lernen (Reinforcement Learning)	27
2.2.6 Neuronale Netze	29
2.2.7 Planungsorientierte Verfahren	33
2.3 Methodik zum Entwurf mechatronischer Systeme	35
2.3.1 V-Modell für die Entwicklung mechatronischer Systeme	35
2.3.2 Anwendung auf Selbstoptimierung	38
2.3.3 Vorgehen beim modellbasierten Systementwurf	39
2.3.4 Modellbildung mechatronischer Systeme	42
2.3.5 Abstraktionsebenen in der Modellbildung	43
2.3.6 Objektorientiertes Mechatronikmodell (OMM)	46
2.3.7 Rechnergestützte Simulation	48
2.4 Struktur mechatronischer Systeme	50
2.4.1 Systembegriff	50
2.4.2 Funktionsorientierte Modellierung und Strukturierung	52
2.4.3 Modular-hierarchische Bauteilstruktur	53

2.5	Agententechnik als Entwurfsparadigma für proaktive Informationsverarbeitung	55
2.5.1	Einführung	55
2.5.2	Klassifizierung von Agenten	57
2.5.3	Multiagentensysteme	58
3	Konzept für Entwurf und Struktur selbstoptimierender Systeme	59
3.1	Einführung	59
3.2	Rekonfigurierbare Systeme als Grundlage für Selbstoptimierung in mechatronischen Systemen	60
3.3	Modellierung von hybriden Systemen	64
3.3.1	Beschreibung hybrider Systeme	64
3.3.2	Hybride Hierarchieelemente	65
3.4	Operator-Controller-Modul (OCM)	69
3.4.1	Grundlagen zum OCM	69
3.4.2	Aufbau des erweiterten OCM	70
3.4.3	Rekonfiguration mit Hilfe des OCM	76
4	Numerische Simulation und Ausführung von modularen Systemen	79
4.1	Mathematische Modelle	79
4.2	Numerische Simulation mechatronischer Systeme	79
4.2.1	Genauigkeit und Stabilität numerischer Berechnungsverfahren	81
4.2.2	Voraussetzungen für unterschiedliche Schrittweiten	83
4.3	Verkopplung von Teilsystemen	83
4.3.1	Numerische Fehler durch Aliasing	84
4.3.2	Erzeugung von Störfrequenzen durch Kopplung von Teilsystemen	89
4.3.3	Multirate-Systeme und Multirate-Integration	94
4.3.4	Grenzen des Modellierungsansatzes	94
4.4	Ansätze zur Vermeidung von Störeffekten in Multirate-Systemen	95
4.4.1	Kompensation der Aliasing-Effekte durch Glättung der Koppeldaten	96
4.4.2	Extrapolation der Koppeldaten	97
4.4.3	Gleichzeitiger Einsatz von Glättung und Extrapolation	98
4.4.4	Aufwand und Fehler	99
4.4.5	Reihenfolge der Auswertung der Teilsysteme	100
4.4.6	Erweiterung von Runge-Kutta-Verfahren zu Multirate-Verfahren	101
4.4.7	Fazit	103
5	Informationsverarbeitung – Entwurf und Implementierung	105
5.1	Modularisierung von Modellen	105
5.1.1	Zerlegung in Teilkomponenten	105
5.1.2	Modularisierung der Systemgleichungen	106
5.1.3	Modularisierung nach Ausgangsblöcken	108
5.2	Modulare Codegenerierung und Steuerung	110
5.2.1	Partitionierung	110
5.2.2	Steuerung der Auswertung	112
5.3	Laufzeitumgebung IPANEMA	112

5.3.1	Grundkonzept	112
5.4	Informationstechnische Realisierung hybrider Komponenten	114
5.4.1	Diskussionsgrundlagen	115
5.4.2	Hybride Modellierung	117
5.4.3	Hybride Statecharts	120
5.4.4	Schnittstellen-Statecharts	121
6	Anwendungsbeispiele für Selbstoptimierung	123
6.1	Ein Beispiel für Hierarchisierung und Multirate: Magnetbahn	123
6.1.1	Modellierung	124
6.1.2	Multirate-Integration	129
6.1.3	Modellerweiterungen für Multirate	130
6.1.4	Simulationsergebnisse	131
6.2	Ein Beispiel für Verhaltensbasierung: Aktives Fahrwerk	133
6.2.1	Aufgabenstellung	133
6.2.2	Verhaltensbasierter Ansatz	136
6.2.3	Aufbau des Operator-Controller-Moduls (OCM)	136
6.2.4	Kognitiver Operator: Zustandsmaschine und Verhalten	138
6.2.5	Simulationsergebnisse	140
6.3	Ein Beispiel für verteilte Optimierung: Trajektorienoptimierung bei schienengebundenen Fahrzeugen	142
6.3.1	Technischer Aufbau des Modellsystems	142
6.3.2	Sollbahnoptimierung	143
6.3.3	Regelung des Aufbaus mit Führungsvorgabe	145
6.3.4	Optimierungsverfahren	147
6.3.5	Struktur der Informationsverarbeitung	149
6.3.6	Simulationsszenario und -ergebnisse	150
7	Zusammenfassende Diskussion und Ausblick	155
A	Literaturverzeichnis	157
B	Stichwortverzeichnis	171

Abbildungsverzeichnis

1.1	ADAC-Pannenstatistik 2005: Verteilung der Pannen (alle Baujahre)	1
1.2	Projektstruktur des SFB 614	5
1.3	Schematische Darstellung der Gliederung der vorliegenden Arbeit	9
2.1	Grundfunktion eines adaptiven Regelungssystems	12
2.2	<i>Modell Identification Adaptive Controller</i> (MIAC)	12
2.3	Struktur eines Regelkreises mit prozessabhängiger automatischer Wahl der Reglerparameter	14
2.4	Die Aspekte Einflüsse, Ziele, Verhalten, Struktur und Parameter eines selbstoptimierenden Systems	15
2.5	Prinzip des Optimierungsverlaufs eines Gradientenverfahrens	20
2.6	Suchrichtungsbestimmung durch Kegel um Gradienten	21
2.7	Braitenberg Vehicle	22
2.8	Braitenberg Vehicle mit unbestimmtem Verhalten	23
2.9	Potentialfeld zur Vorgabe von Steuergrößen	24
2.10	Addition von Potentialfeldern	24
2.11	Bahntrajektorie durch Überlagerung von Verhalten	25
2.12	Das Standardmodell für Reinforcement Learning	28
2.13	Radial-Basis-Funktionen (RBF)-Netz	29
2.14	Indirekte adaptive Regelung mit Vergleichsmodell	30
2.15	Regelung mit internem Prozessmodell	31
2.16	Elektromechanisches Positioniersystem (EMPS)	31
2.17	Struktur der Regelung mit Aufschaltung	32
2.18	Neuronale Netzwerke zur Kompensation nichtlinearer Reibung	32
2.19	Hybride Architektur	33
2.20	BDI-Architektur	34
2.21	Das V-Modell der Informatik	36
2.22	Das V-Modell als Referenzmodell zur Entwicklung mechatronischer Produkte	38
2.23	Vorschlag für ein V-Modell der Selbstoptimierung (modellbasiert)	39
2.24	Vorgehen beim modellbasierten Systementwurf	40
2.25	Abstraktionsebenen im Modellbildungsprozess	43
2.26	Modellabstraktionsebenen im Modellbildungsprozess	44
2.27	Objektorientiertes Mechatronikmodell (OMM)	47
2.28	Feder-Neigetechnik-Prüfstand der <i>Neuen Bahntechnik Paderborn</i>	49
2.29	Definition des Begriffs System	50
2.30	Allgemeine Systemdarstellung	51
2.31	Unterteilung von technischen Systemen nach DIN 40150	51
2.32	Unterteilung nach DIN 40150 am Beispiel eines Kfz	52

2.33	Modular-hierarchische Bauteilstruktur	54
2.34	Unterschied zwischen Objekt und Agent	56
3.1	Gestufter Tandemhauptzylinder mit Zentralventil	60
3.2	Schematischer Aufbau einer Zweikreis-Bremsanlage	60
3.3	Zweikreisbremse: Grundkonfiguration	61
3.4	Zweikreisbremse: Bremskreis 2 ausgefallen	61
3.5	Zweikreisbremse: Bremskreis 1 ausgefallen	62
3.6	Erweitertes objektorientiertes Mechatronikmodell	63
3.7	Blockschaltbilder in den CAE-Werkzeugen CAMeL-View und MATLAB	66
3.8	Hierarchische Blockschaltbilder	67
3.9	Rekonfiguration auf Topologieebene	67
3.10	Hybride Hierarchieelemente	68
3.11	Struktur der Blockverschaltung ohne und mit Rekonfiguration	68
3.12	OCM nach Naumann	69
3.13	Schematischer Aufbau des erweiterten Operator-Controller-Moduls	73
3.14	Beispiel für den inneren Aufbau eines Kognitiven Operators	75
4.1	Multirate-System mit zwei Teilsystemen	81
4.2	Stabilitätsbereiche expliziter RK-Verfahren	83
4.3	Testsystem aus zwei PT_2 -Gliedern	84
4.4	Aliasing-Effekt bei Multirate-Integration	85
4.5	Ersatzmodell der Serienschaltung zweier PT_2 -Glieder bei Kopplung vom langsamen zum schnellen System	85
4.6	Spektrum des δ -Abtasters	86
4.7	Spektrum des Abtast-Halteglieds	86
4.8	Kreisfrequenzen der rücktransformierten Funktion	89
4.9	Hohe Frequenzanteile durch Multirate-Integration	90
4.10	Integration ohne Multirate	90
4.11	Ersatzmodell für Multirate-Integration bei Kopplung vom schnellen zum langsamen System	91
4.12	Modell zur Anwendung der modifizierten z-Transformation	91
4.13	Antwortsignal mittels modifizierter z-Transformation	93
4.14	Modell der Diskretisierung	94
4.15	Schema eines Multirate-Verfahrens	96
4.16	Vergleich der Systemantworten mit und ohne Glättung zum exakten Verlauf	98
4.17	Multirate-Integration mit und ohne linearer Extrapolation	99
4.18	Stabilitätsbereiche von Multirate Runge-Kutta-Verfahren	103
5.1	Gekoppelte Teilsysteme mit vektorieller Datenkopplung	106
5.2	Kommunikation zweier Teilsysteme mit Aufteilung in ND-, D- und S-Code	107
5.3	Verklemmung durch eine Rückkopplung im D-Code	108
5.4	Berechnung der Auswertereihenfolge nach Ausgangsblöcken	109
5.5	Auswertegraph eines Basisblocks	111
5.6	Auswertegraph einer Hierarchie	111
5.7	Typische Objekttopologie einer IPANEMA-Anwendung	114
5.8	Versuchsmodell einer Magnetbahn	115

5.9	Verschiedene Reglerkonfigurationen	116
5.10	Kontrolle der Überblendung mit Hilfe eines Statecharts	117
5.11	Hybride Sicht des Aufbaureglers mit Überblendung in vollständiger Darstellung	119
5.12	Struktur des Reglersystems als Monitor	120
5.13	Hybride Sicht des Aufbaureglers mit Überblendung (Verhalten der Komponente)	121
5.14	Interface-Statechart der Komponente Aufbauregler	121
6.1	Modular-hierarchische Struktur des Gesamtmodells mit Regelung	124
6.2	Gesamtmodell der Magnetbahn in CAMEL	124
6.3	CAMEL-Modell des MFM Schlitten	125
6.4	Modell der mechanischen und der elektromagnetischen Elemente	125
6.5	Mechanisches Teilsystem des AMS Aufbau	128
6.6	Erweiterung des MFM <i>Schlitten</i> durch Filter	130
6.7	Simulation mit gemeinsamer Schrittweite für beide Teilsysteme	131
6.8	Verlauf der Spaltbreitenänderung bei Multirate-Integration	132
6.9	Verlauf der Aufbaubeschleunigung bei Multirate-Integration	133
6.10	Entwicklung eines Viertelfahrzeugmodells	134
6.11	Starrkörpermodell mit Rädern	135
6.12	OCM-Struktur der selbstoptimierenden Fahrwerksregelung	137
6.13	Zustandsautomat der selbstoptimierenden Fahrwerksregelung	138
6.14	Verhalten der selbstoptimierenden Fahrwerksregelung (schematisch)	139
6.15	Anregungsfunktion der Fahrsimulation	140
6.16	Aufbaubeschleunigung bei verschiedenen Reglerkonfigurationen	141
6.17	Federweg bei verschiedenen Reglerkonfigurationen	141
6.18	Aktive Federung des Railcab	142
6.19	Optimierung der Trajektorie	144
6.20	Grundstruktur der verteilten Optimierung	145
6.21	Klassischer Regelungsansatz mit Relativ- und Skyhook-Anteil	146
6.22	Reglungsstruktur mit kombinierter Sollgeschwindigkeit	147
6.23	Änderung einer Splinekurve durch Verschiebung einer Stützstelle	147
6.24	Änderung der ersten Ableitung durch Verschiebung einer Stützstelle	148
6.25	Änderung der zweiten Ableitung durch Veränderung einer Stützstelle	148
6.26	Makrostruktur der Informationsverarbeitung	150
6.27	Teststrecke der <i>Neuen Bahntechnik Paderborn</i>	151
6.28	Vertikalverlauf der Schiene	151
6.29	Geschwindigkeitsvorgabe des Shuttleaufbaus	152
6.30	Zeitantwort des Shuttleaufbaus	152
6.31	Verlauf der Zielgrößen bei Streckenabschnitt 2 zu Beginn und nach 10.000 sec	153