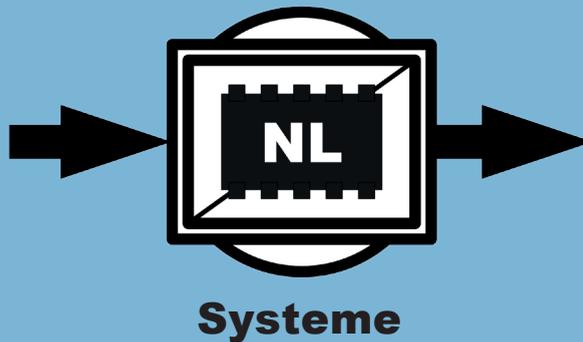


Karlheinz Wolfmüller

Nichtlineare Entkopplungsregelung



Symbolischer Entwurfsstandard
Nichtlinearer Mehrgrößen-Systeme

Berichte aus der Steuerungs- und Regelungstechnik

Karlheinz Wolfmüller

Nichtlineare Entkopplungsregelung

Symbolischer Entwurfsstandard Nichtlinearer Mehrgrößen-Systeme

Shaker Verlag
Düren 2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8057-5

ISSN 0945-1005

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Abstrakt

Die **Nichtlineare Entkopplungsregelung** von **nichtlinearen MIMO-Systemen** wird unter dem besonderen Aspekt des Störverhaltens der Regelgrößen und der **Störgrößenkompensation** behandelt. Es werden Lösungsvorschläge dazu ausgearbeitet. Zusätzlich werden alle Projektschritte der Modellbildung, Analyse, Synthese, Simulation, Code Generierung und Echtzeit-Realisierung von **nichtlinearen Regelsystemen** konsequent **symbolisch** mit analytischen Werkzeugen durchgeführt. Es entstehen Lösungen, die mit **strukturellen Standards** realisiert sind, unabhängig von Inhalt spezifischen Eigenschaften eines Projekts. Es wird damit immer das regelungstechnische Problem einer **Systemklasse** gelöst im Gegensatz zu den speziellen Lösungen numerischer Verfahren. Es wird eine **Programm-Bibliothek** mit entsprechenden **symbolischen Tools** für die einzelnen Entwurfsschritte vorgestellt. In einem Anwendungsbeispiel der **Trajektorien-Spurregelung** eines **Fahrzeug-Modells** wird die Vorgehensweise in allen Schritten ausführlich angewendet. Im Anhang werden noch einige **Laborbeispiele** zu diesem Thema behandelt und Werkzeuge zur **Code Generierung** und der **Echtzeit-Realisierung** vorgestellt.

Abstract

The **Nonlinear Decoupling control** of **nonlinear MIMO-Systems** are treated with special consideration of **disturbance behaviour** of the controlled sizes and the **disturbance rejection**. Proposals for solutions are being worked out. In addition, all project steps of modeling, analysis, synthesis, simulation, code generation and real-time implementation of **nonlinear control systems** are consistently carried out **symbolically** with analytical tools. Solutions are created that are implemented using **structural standards**, independent of content specific properties of a project. This always solves the control problem of a **system class** in contrast to the special solution of numerical methods. A **program library** with corresponding **symbolic tools** for the design steps is presented. In an application example of the **trajectory tracking control** of a **vehicle model**, the procedure is used in detail in all steps. In the appendix, some **laboratory examples** on this topic are treated and tools for **code generation** and **real-time implementation** are presented.

Vorwort

Mit dem Wintersemester 2020/21 endet meine aktive Dienstzeit als Professor für Systemdynamik und Regelungstechnik an der Hochschule Heilbronn nach 34 Jahren im 68. Semester. Aus diesem Anlaß habe ich mich entschlossen, das letzte Semester unter den gegebenen besonderen Bedingungen der Corona-Pandemie zu nutzen, einige Schwerpunkte meiner Tätigkeit im Lehr- und Laborbetrieb näher zu betrachten.

Die Themen der vorliegenden Dokumentation haben mich schon in meiner Ausbildung und in meinem ganzen Berufsleben begleitet, beschäftigt und fasziniert. Es werden Erfahrungen, Erkenntnisse und Entwicklungen in meinem Tätigkeitsbereich der akademischen Lehre und der anwendungsorientierten Forschung und Entwicklung an der HHN dokumentiert. Das Buch repräsentiert den heute erreichten Stand der Entwicklungen im RT2-Labor der Hochschule Heilbronn in den dargestellten Themenbereichen. Die wesentlichen Schwerpunkte in dieser Einrichtung der Hochschule sind: Die Anwendung der Systemdynamik und Regelungstechnik Grundlagen, die Entwicklung methodischer Ansätze zur Lösung regelungstechnischer Probleme in der Anwendung, die Nutzung verfügbarer Software Werkzeuge bei Entwicklungsprozessen in Projekten und die Konfiguration und Verifizierung von Hardware und Software bei der Echtzeit Realisierung von Regelsystemen.

Es ist naheliegend, den Anlaß für einen Rückblick zu nutzen, die Entwicklungen in meinem Tätigkeitsbereich in einem historischen Zusammenhang seit Mitte der 1960-er Jahre bis heute zu betrachten. In einem halben Jahrhundert Ausbildungs- und Berufsleben erinnert man sich an die Meilensteine auf der Zeitachse. Die Impulse zur erfolgreichen Anwendung mathematischer Methoden zur Lösung von komplexen, technologischen Aufgabenstellungen kamen z.B. unter anderem von der Luft- und Raumfahrt mit dem Mondlandprogramm der Amerikaner in den 1960-er Jahren. Als 13-jähriger Schüler saß ich in den frühen Morgenstunden vor einem kleinen, flimmernden Schwarz/Weiss-Röhrenfernseher und habe den historischen Moment des Betretens des Mondes durch den Menschen an Hand von schemenhaften Bildern gebannt live verfolgt. Offensichtlich haben solche Ereignisse in mir die Faszination und Begeisterung für Naturwissenschaft und Technik ausgelöst. Ich hatte das Glück einen begnadeten Hochschullehrer, wie es Prof. Föllinger im Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik am heutigen KIT in Karlsruhe war, im Hörsaal live zu erleben und von seinem Wissen und seiner außergewöhnlichen Fähigkeit zu profitieren, komplexe mathematische Zusammenhänge für Studierende verständlich zu machen. Er war Vorbild für mich als Hochschullehrer. Seit der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts gehören die Zeitbereichsmethoden im Zustandsraum zum Ausbildungsstandard der Systemdynamik und Regelungstechnik in der akademischen Lehre. Die Systemtheorie auf der Basis der Zeitbereichsverfahren im Zustandsraum stellt Naturwissenschaftlern und Ingenieuren scharfe Werkzeuge bei der Modellbildung, Analyse und Synthese zur Lösung komplexer Aufgaben zur Verfügung. Man muß allerdings eingestehen, dass im letzten Jahrhundert der Aufwand bei der technischen Realisierung, insbesondere durch die Kosten der Hardware, sehr hoch war. In Standardtechnologien konnten sich in den Anfangszeiten moderne Regelungskonzepte auf breiter Basis noch nicht durchsetzen. Das sollte sich im Laufe der Zeit mit neuen technologischen Entwicklungen im Hardware- und Softwarebereich stark ändern. Neue Werkzeuge verbessern zunehmend die Lösungskompetenz bei den Entwicklungsprozessen in Anwendungsprojekten. Diese Entwicklung läßt sich an einigen entscheidenden Veränderungen auf der Zeitachse festmachen.

In den 1970-er Jahren wurde in der Regelungstechnik der Analogrechner vom Digitalrechner abgelöst. Mitte bis Ende der 1980-er Jahre werden erste mathematische Tools wie MATLAB

angeboten. Bereits 1988 konnte die erste MATLAB-Lizenz für die HHN angeschafft werden. In der Anfangszeit bestand MATLAB nur aus dem Bedienfenster eines Ascii-Terminals in dem im MATLAB-Workspace komplexe Rechenoperationen unter anderem auch mit Vektor- und Matrizenvariablen durchgeführt werden konnten. Man hat sehr schnell erkannt, dass damit hervorragende Voraussetzungen für die Benutzung dieses mathematischen Tools in der Regelungstechnik gegeben waren. Sehr günstige Sondernutzungsrechte für Hochschulen und Studierende haben dann die Markteinführung des Tools in der Regelungstechnik zu einem weltweit genutzten Standard-Tool stark begünstigt. Mit der Einführung des Internets beginnt das Zeitalter der Rechnernetze mit gravierenden Auswirkungen auf den Alltag der Naturwissenschaftler und Ingenieure. In den 1990-er Jahren wird der PC zu einem ernsthaft nutzbaren Hilfsmittel. Durch die Hardware und Software Entwicklung stehen immer leistungsfähigere Betriebsmittel in den Labors zur Verfügung. Im Bereich der methodischen Grundlagen taucht immer häufiger der Begriff Flachheit und flachheitsbasierter Reglerentwurf auf. Direkte Methoden der nichtlinearen Systembeschreibung und der nichtlinearen Entwürfe von Regelsystemen stehen zusätzlich zu den Linearisierungsverfahren zur Verfügung. Im neuen Jahrtausend werden die grafischen Oberflächen immer leistungsfähiger. Parallel dazu findet eine rasante Weiterentwicklung der Mikroprozessoren und Schnittstellen Bausteine statt. Der Trend zur Digitalisierung setzt auch in der industriellen Automatisierungstechnik ein. Es stehen zunehmend Sensor/Aktor-Bausteine mit digitalen Interfaces zur Verfügung. Mit der Entwicklung mobiler Endgeräte im letzten Jahrzehnt ist ein Leistungssprung verfügbarer Mikroprozessoren, Halbleiterspeicher, digitaler Interface- und Sensor/Aktor Bausteine bei sehr stark fallenden Kosten verbunden. Unter diesen Voraussetzungen sind sehr komplexe und numerisch aufwendige Algorithmen in der Regelungstechnik bei minimalen Kosten realisierbar. Erstmals sind nicht mehr die Hard- und Software Realisierungskosten bestimmend und begrenzend für den Realisierungsschritt der Lösung eines Regelsystems, sondern die Fähigkeiten der Entwickler. Die neuen Chancen zur Realisierung hervorragender Lösungskonzepte in der Regelungstechnik hängen mehr den je von der Qualität der Ausbildung und Lehre ab. Das sind die herausfordernden Randbedingungen zukünftiger Hochschulentwicklungen. Qualität steht in dieser Disziplin eindeutig vor Quantität. Das haben Hochschulen in der Ausrichtung ihrer zukünftigen Angebote verstärkt zu beachten.

Neben der Erfüllung der fachlichen Lehrverpflichtungen hatte in der ersten Hälfte meiner Tätigkeit in der Hochschule die Ausübung verschiedener Ämter in der Selbstverwaltung hohe Priorität. Ich konnte einschlägige und nachhaltige Erfahrungen in den meisten in einer Hochschule zu vergebenden Ämter machen. Die Tätigkeiten als Dekan, Studiengangleiter (Studien-dekan), Mitglied im Hochschulrat und Mitglied im Senat verschafften Einblicke in die Abläufe in einer Hochschule. Stärken und Schwächen in den Entscheidungsprozessen einer demokratisch verfassten Institution haben sich mir nicht zuletzt auch durch die Anwendung der scharfen Analyse-Werkzeuge meiner wissenschaftlichen systemtheoretischen Ausbildung schonungslos offenbart. Ich war immer bestrebt die Wahrhaftigkeit in meinem Verhalten zu priorisieren. Davon bin ich mehr denn je überzeugt, insbesondere deshalb, weil die inhaltlichen und strukturellen Beschlüsse aus dieser Zeit in der Bewertung aus heutiger Sicht in manchen Technikbereichen zu keinen tragfähigen Lösungen in der Hochschulentwicklung geführt haben, weil die Entscheidungsgrundlagen nicht der realen Faktenlage entsprochen haben.

Mit den Themen dieses Buches habe ich meine berufliche Laufbahn mit der Dissertation [16] und mit sehr primitiven Hilfsmitteln und Werkzeugen aus heutiger Sicht begonnen. Eine Generation später kann ich mit ganz anderen Voraussetzungen und Lösungen mit dieser Dokumentation meine aktive Dienstzeit abschließen.

Zum Schluß möchte ich mich ganz besonders bei meinem Assistenten Dipl.-Ing.(FH) Joachim Fischer bedanken. Er war über lange Jahre für die organisatorische Durchführung der Praktika, die Wartung und Pflege der Laboreinrichtungen und der Rechnernetze zuständig. Er war unermüdlich jederzeit bereit die Studierenden mit Rat und Tat in den Labors zu unterstützen und ihre Fragen zu den Lehrinhalten zu beantworten.

Bei meinem langjährigen Wegbegleiter Prof. Dr. Rudolf Kern möchte ich mich für die Unterstützung in vielen Bereichen des Alltags der Hochschule bedanken. Wir haben uns gegenseitig in Lehrveranstaltungen vertreten, wenn es durch die Ausübung eines Amtes erforderlich war. Ich konnte in fachlichen Diskussionen von sehr vielen nützlichen Hinweisen und Anregungen für die Lehre und den Laborbetrieb profitieren. Er war auch maßgeblich mitverantwortlich für die Einrichtung und den Aufbau des interdisziplinär genutzten RT2-Labors.

Für die sehr gute und konstruktive Zusammenarbeit bei der Durchführung des Projektes der Trajektorien Entkopplungsregelung eines Fahrzeuges bedanke ich mich bei Prof. Dr. Frank Tränkle und M.Sc.Dipl.-Ing(FH) Uwe Ingelfinger.

Eppingen, im Mai 2021

1	Einführung.....	1
2	Modellbildung Nichtlinearer Dynamischer Systeme	3
2.1	Übertragungsmodelle	4
2.1.1	Lineare Übertragungsmodelle	5
2.2	Zustandsraummodelle	5
3	Analyse Nichtlinearer Systeme.....	11
3.1	Eigendynamik eines NL-Systems	11
3.2	Steuerbarkeit	11
3.3	Beobachtbarkeit	12
3.4	Flachheit und Entkoppelbarkeit des Systemausgangs	12
3.4.1	Definition der Flachheit.....	12
3.4.2	Entkoppelbarkeit.....	13
4	Synthese Nichtlinearer Steuerungs- und Regelsysteme	15
4.1	NL-Steuerung.....	16
4.2	NL-Zustandsregelung von SISO-Systemen	17
4.3	NL-Zustandsregelung von MIMO-Systemen	18
4.3.1	Eigendynamik geregelter nichtlinearer MIMO-Systeme.....	19
4.4	NL-Zustandsregelung mit Störgrößenkompensation	20
4.4.1	Ie-Zustandsregelung zur Störgrößenkompensation	21
4.4.2	PI-Zustandsregelung zur Störgrößenkompensation.....	21
4.5	NL-Zustandsbeobachter	24
4.6	NL-Zustandsregelung mit NL-Zustandsbeobachter.....	25
4.7	NL-Entkopplungsregelung.....	26
4.8	NL-Entkopplungsregelung, Beobachter und Störgrößenkompensation	32
4.8.1	Störmodelle mit PI-Zustandsregelung der Regelabweichungen.....	34
4.8.2	Schätzmodelle der Störgrößen mit Iz-Zustandsregelung.....	35
4.8.3	Störgrößenbeobachter der Ausgangssysteme mit Iz-Zustandsregelung	37
4.8.4	Entkopplungsregelung mit erweitertem NL-Störgrößenbeobachter.....	40
4.8.5	Dynamischer Entkopplungsregler mit Störgrößenkompensation	43
4.9	NL-Prädiktor Entkopplungsregelung.....	45
4.10	Exakte Linearisierung bei Nichtlinearen SISO-Systemen	47
4.10.1	Exakte Linearisierung mit Störgrößenkompensation	48
5	Simulation Nichtlinearer Standard-Modelle	49
5.1	Entwicklung symbolischer Simulationsprogramme	49
5.2	Standard-Aufbau symbolischer Simulationsprogramme	50
6	Nichtlineare Entkopplungsregelung eines Fahrzeugmodells	57
6.1	Aufgabenstellung, Zielsetzung.....	58
6.2	Modellbildung des Fahrzeugs	59
6.2.1	Ausgangs-Modell_1 im absoluten Ortskoordinatensystem	63
6.2.2	Ausgangs-Modell_2 im relativen Ortskoordinatensystem	63
6.2.3	MATLAB-Function der Zustandsgleichungen	64
6.2.4	Jacobi-Matrizen Modelle des Fahrzeugs	65
6.2.5	Modellparameter und Größen verschiedener Fahrzustände	65
6.3	Analyse des Fahrzeugverhaltens und der Eigenschaften	67
6.3.1	Fahrzeug Eigendynamik	67
6.3.2	Steuerbarkeit	68
6.3.3	Beobachtbarkeit	68
6.3.4	Entkoppelbarkeit.....	69

6.4	Synthese des Regelsystems	69
6.4.1	NL-Entkopplungsregelung	69
6.4.2	Dynamischer Gleichgewichtszustand	72
6.4.3	NL-Beobachter	74
6.4.4	NL-Differenzierfilter	77
6.4.5	NL-Prädiktor Entkopplungsregelung	79
6.4.6	Störgrößenkompensation	81
6.5	Simulation des Fahrzeugverhaltens mit MATLAB/Simulink	83
6.6	Simulationsergebnisse	88
6.6.1	Simulationsergebnisse für Fahrversuche ohne Totzeiten	89
6.6.2	Störverhalten im absoluten Koordinatensystem	92
6.6.3	Simulationsergebnisse Prädiktor - Entkopplungsregelung	95
6.7	Echtzeit-Realisierung des Regelsystems mit C/C++ - Code	97
6.7.1	Simulink Real-Time xpc-Zielsysteme mit Hardware-in-the-Loop Simulation	100
6.7.2	Raspi4 - Linux Zielsysteme mit C- Code und Toolchain GNU GCC	105
6.7.3	ROS Devices/Nodes mit Catkin-Toolchain auf Linux Systemen	112
6.7.4	ROS2 Devices/Nodes mit Colcon-Toolchain auf Windows Systemen	118
7	Symbolic Tools-Library „rt2lib“	121
7.1	Modell Funktionen der „rt2lib“	122
7.2	Analyse Funktionen der „rt2lib“	124
7.3	Synthese Funktionen der „rt2lib“	125
7.4	Simulink Templates Library „simulink_rt2lib“	133
8	Zusammenfassung	135
	Literaturverzeichnis	139
	Bezeichnungen, Abkürzungen	141
	Anhang	145
1	Hydrodynamisches 3 - Tank Modell	147
1.1	Aufgabenstellung, Zielsetzung	148
1.2	NL-Hydrodynamisches 3-Tank Simulationsmodell	149
1.3	Ergebnisse der Simulation	150
1.3.1	Nichtlineare Steuerung	150
1.3.2	Nichtlineare Entkopplungsregelung	150
2	Gasdynamisches MIMO - Modell	155
2.1	Aufgabenstellung, Zielsetzung	157
2.1.1	NL-Gasdynamisches Zustandsraummodell mit Entkopplungsregler	158
2.2	NL-Gasdynamisches Simulationsmodell	160
2.3	Ergebnisse der Simulation	161
2.3.1	Nichtlineare Steuerung	161
2.3.2	Nichtlineare Entkopplungsregelung	161
3	Symbolisches Magnet Schwebekörper Modell	165
3.1	Aufgabenstellung, Zielsetzung	166
3.1.1	Modellbildung	167
3.1.2	Analyse	168
3.1.3	Synthese	169

3.2	Magnet Schwebekörper Simulationsmodell	171
3.3	Ergebnisse der Simulation.....	172
3.3.1	Nichtlineare Zustandsregelung	172
3.3.2	Nichtlineare PI-Zustandsregelung	173
3.3.3	Zustandsregelung durch Exakte Linearisierung mit Störgrößenkompensation	174
3.4	Echtzeit-Realisierung	175
4	Metallstab Temperaturprofil - Entkopplungsregelung	179
4.1	Aufgabenstellung, Zielsetzung.....	180
4.2	Zustandsraummodell.....	181
4.2.1	Parameteroptimierung.....	185
4.3	MIMO-Zustandsregler und Entkopplungsregler Entwurf.....	185
4.4	Metallstab Simulationsmodell.....	186
4.5	Ergebnisse der Simulation.....	187
4.5.1	Zustandsregelung.....	187
4.5.2	Entkopplungsregelung	188
5	RT2 - Labor, Entwicklungsarbeitsplatz Echtzeitsysteme	191
5.1	Simulink Real-Time Toolbox zur Realisierung von xpc-Target Systemen.....	194
5.1.1	xpc-Target Echtzeitprogramme.....	195
5.2	MATLAB Support Package für Debian-Linux und Raspberry PI	200
5.3	ROS- und ROS2-Toolbox	203
6	Standard - Regelkreis Temperaturregelung	207
6.1	Aufgabenstellung, Zielsetzung.....	208
6.2	Modellbildung des thermischen Systems.....	209
6.2.1	Systemtheoretische Betrachtung Thermischer Massen	213
6.3	Realisierung der Regelung mit einem Microcontroller.....	216
6.4	Durchführung der Regelversuche	218
6.4.1	Simulation der Regelkreise mit 2Punkt-, P-, PD-, PI- und PID- Regler	220
6.4.2	Versuchsergebnisse der Regelung mit 2Punkt-, P-, PD-, PI- und PID- Regler	222
6.4.3	Anti-Windup Control.....	224
6.4.4	Prädiktor-Regelung.....	226
6.4.5	Vergleich Simulation und Experiment.....	227
	Sachwortverzeichnis.....	229