

# 37. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD

## 19.-21. FEBRUAR 2003

### Programm und Kurzfassungen

#### Mittwoch, 19. Februar 2003

Nachmittags **Anreise**  
**18:30** **Abendessen** im Bellevue Rheinhotel

#### Donnerstag, 20. Februar 2003

**08:45 – 09:00** **Eröffnung und Begrüßung (Raum 1)**  
*Prof. Dr.-Ing. U. Epple, RWTH Aachen*

	Raum 1	S.	Raum 2	S.
<b>09:00 – 10:30</b>	<b>Bildererkennung</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. M. Buss		<b>Roboter-Anwendungen</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Schlacher	
09:00 – 09:30	Belastung und Beanspruchung des Menschen bei der Lösung von visuellen Erkennungsaufgaben <i>J. Geisler (Frauenhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung, Karlsruhe, Steusloff, Gr.18)</i>	4	Steuerung von getriebeelastischen Robotern unter Verwendung von automatisch generierten, inversen Systemmodellen <i>M. Thümmel (Institut für Robotik und Mechatronik, DLR, Weßling, Bals, Gr.30)</i>	9
09:30 – 10:00	Strategien für die automatisierte Auswertung von Spuren in der Kriminaltechnik <i>M. Heizmann (Inst. f. Mess- und Regelungstechnik mit Maschinenlaboratorium, Univ. Karlsruhe, Stiller, Gr.17)</i>	5	Intelligente Blickwinkelsteuerung für visuell geführtes humanoides Gehen <i>J.F. Seara (TU München, Schmidt, Gr.21)</i>	11
10:00 – 10:30	Ein Verfahren zur video-basierten Identifikation von raumbezogenen Verkehrszustandsvariablen <i>K.P. Döge (Lehrstuhl f. Verkehrsleitsysteme und Prozessautomatisierung, TU Dresden, Strobel, Gr.10)</i>	7	Sliding-Mode-Folgeregelung gliedflexibler Roboter am Beispiel eines mehrgliedrigen Manipulators <i>D. Hiseine (Professur für Steuerung, Regelung und Systemdynamik, Universität Duisburg, Söffker, Gr.11)</i>	13

**10:30 – 11:00** **Kaffee-/Teepause**

# 37. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD

19.-21. FEBRUAR 2003

11:00 – 12:30		<b>Mechatronische Systeme</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. F. Svaricek	<b>Theorie nichtlinearer Systeme</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr. tech. A. Kugi	
11:00 – 11:30	Multiraten-Abtastregelung mechatronischer Systeme am Beispiel einer kaskadierten Antriebsregelung <i>J. Winkelhake (Inst. f. Elektrische Informationstechnik, TU Chemnitz, Konigorski, Gr.4)</i>	14	Sind nichtlineare prädiktive Regler robust? <i>R. Findeisen (Inst. f. Systemtheorie technischer Prozesse, Univ. Stuttgart, Allgöwer, Gr.26)</i>	18
11:30 – 12:00	Das Zusammenspiel zwischen Abstimmung der Systemdynamik und der Konstruktion während des Entwurfs mechatronischer Systeme am Beispiel einer vollaktiven, integrierten Radaufhängung <i>T. Koch (MLaP, Univ. Paderborn, Lückel, Gr.22)</i>	16	Flachheitsbasierte Folgeregelung von Systemen mit verteilten Parametern mittels Randeingriff <i>T. Meurer (Inst. f. Systemdynamik und Regelungstechnik, Zeitz, Gr.27)</i>	20
12:00 – 12:30			Schätzung von Einzugsgebieten polynominaler nichtlinearer dynamischer Systeme als semidefinite Optimierungsaufgabe <i>O. Hachicho (Univ. Wuppertal, Tibken, Gr.29)</i>	22

**12:30 – 15:00 Mittagessen / Pause zum Spaziergang mit Gesprächen am Rheinufer!**

15:00 - 16:00		<b>Hybride Systeme</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. D. Abel	<b>Zyklische Prozesse</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. S.X. Ding	
15:00 – 15:30	Abstraktionsbasierte Analyse gesteuerter hybrider Systeme <i>O. Stursberg (Lehrst. Anlagensteuertechnik, Univ. Dortmund, Engell, Gr.8)</i>	24	Adaptive Führung eines Gleitlagerprüfstands <i>R. Bauer (Inst. f. Regelungstechnik, TU Graz, Dourdoumas, Gr.12)</i>	28
15:30 – 16:00	Fehlerdiagnose auf der Grundlage zeitbewerteter Automaten <i>P. Supavatanakul (Lehrst. f. Automatisierungstechnik und Prozessinformatik, Univ. Bochum, Lunze, Gr.3)</i>	26	Regelung beim Antrieb und Wickeln von elastischen Stoffbahnen <i>D. Knittel (Univ. Strasbourg, Ostertag, Gr.24)</i>	30

**16:00 – 16:30 Kaffee-/Teepause**

16:30 – 17:30		<b>Plenarvortrag</b>
		<b>The role of interactivity in control learning</b> <i>Prof. S. Dormido Bencomo, Fachgebiet für Informatik und Automatisierung, Nationale Fernuniversität, Madrid</i>

**17:30 – 18:00 Offene Diskussion zu aktuellen Themen**

**18:30 Abendessen**

# 37. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD

19.-21. FEBRUAR 2003

## Freitag, 21. Februar 2003

08:30 – 10:00		Verteilte Automatisierung Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. B. Vogel-Heuser		Fahrzeugtechnik Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. U. Konigorski	
08:30– 09:00	DIO als Basis für komponentenbasierte Automatisierungssoftware <i>V. Hänsel (Professur f. Prozessleittechnik, TU Dresden, Rieger, Gr.9)</i>	31	Prüfstand für Entwicklung, Erprobung und Optimierung komplexer Energiespeichersysteme von Elektrofahrzeugen <i>T. Rethmann (Fachgebiet Mess- Steuerungs- und Regelungstechnik, Univ. Bremen, Goch, Gr.5)</i>	35	
09:00 – 9:30	Dynamische Online Diagnose <i>A. Münnemann (Lehrst. f. Prozessleittechnik, RWTH Aachen, Eppe, Gr.1)</i>	33	Modellbasierte Überwachungsmethoden für einen Dieselmotor mit Abgasturbolader <i>A. Schwarte (Inst. f. Automatisierungstechnik, TU Darmstadt, Isermann, Gr.7)</i>	37	
09:30 – 10:00	Haptische Telepräsenz mit Totzeit <i>S. Hirche (Fachgebiet Regelungstechnik, TU Berlin, Buss, Gr.2)</i>	34	Methoden zur Führung von unbemannten Unterwasserfahrzeugen <i>M. Eichhorn (Fakultät für Informatik und Automatisierungstechnik, TU Ilmenau, Wernstedt, Gr.15)</i>	39	

10:00 – 10:30 Kaffee-/Teepause

10:30 – 12:00		Medizintechnische Anwendungen Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. A. Gräser		Optimierung und Simulation Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Werner	
10:30– 11:00	Entwicklung eines navigierten Chirurgieroboters zur Unterstützung bei orthopädischen Eingriffen <i>P. Knappe (Univ. Siegen, Roth, Gr.25)</i>	41	Möglichkeiten zur Verbesserung der Positionsbestimmung am Beispiel der Satellitennavigation <i>M. Gluch (Inst. f. Automatisierungstechnik Univ. Rostock, Lampe, Gr.23)</i>	46	
11:00 – 11:30	Steuerung und Regelungskonzept für eine myoelektrische Handprothese <i>S. Beck (Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Angewandte Informatik, Bretthauer, Gr.16)</i>	43	Durchsatzmaximierung für High-Throughput-Screening Prozesse <i>E. Mayer (Lehrst. f. Systemtheorie technischer Prozesse, Univ. Magdeburg, Raisch, Gr.20)</i>	48	
11:30 – 12:00	Verbesserung der Regelung von Auto-CPAP-Geräten <i>T. Netzel (Inst. für Automatisierungstechnik, Univ. d. Bundeswehr Hamburg, Lunderstädt, Gr.13)</i>	44	Evolutionäre Optimierung von graphischen Bedienoberflächen zur Führung technischer Prozesse <i>A. Völkel (Inst. f. Mess- und Automatisierungstechnik, Univ. Kassel, Johannsen, Gr.19)</i>	50	

12:00 – 12:30 Abschluss / Preisverleihung / Aufruf für Boppard 2004

12:30 – 13:30 Mittagessen

13:30 Ende des Kolloquiums

# Belastung und Beanspruchung des Menschen bei der Lösung von visuellen Erkennungsaufgaben

J. Geisler

Fraunhofer-Institut für Informations- und Datenverarbeitung IITB

Fraunhoferstraße 1, 76131 Karlsruhe

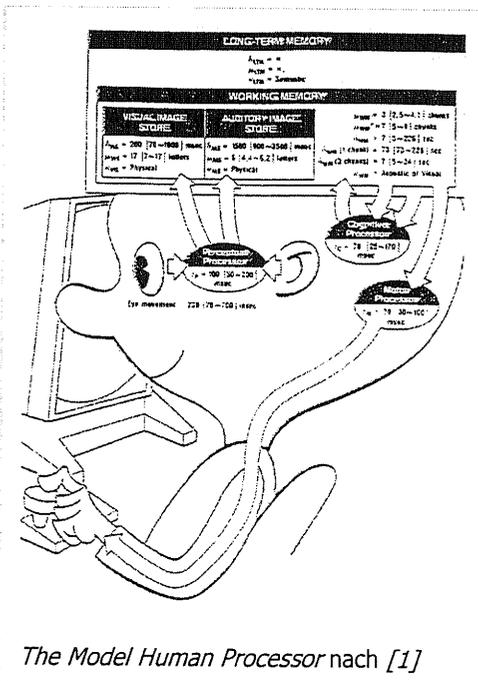
Tel.: +49 - 7 21 - 60 91 - 2 62, E-Mail: juergen.geisler@iitb.fraunhofer.de

## Schlüsselwörter:

Belastung, Beanspruchung, Erkennung, Wahrnehmung, Anthropotechnik, Ergonomie

## Kurzfassung

Die visuelle Wahrnehmung der Umgebung durch Menschen mit dem Zweck der Erkennung aufgabenrelevanter Sachverhalte ist eine Schlüsselaktivität vieler »Man-in-the-Loop«-Prozesse. Beispiele sind die Überwachung von Fertigungsprozessen in der



Industrie oder von Geländen und Gebäuden für Sicherheitsanwendungen. In jedem Fall geschieht die Wahrnehmung nicht für sich allein, sondern ist in ein Handlungsumfeld eingebunden. Handlungen erstrecken sich dabei von der Bedienung des Beobachtungssystems bis zur Beeinflussung des beobachteten Prozesses. Um die Leistung des Menschen als aktivem Beobachter in solchen Systemen zu optimieren, ist eine bündige Modellierung von Wahrnehmen und Handeln des Menschen erforderlich.

Mit dem »Model Human Processor« nach [1] liegt ein etabliertes, ingenieurmäßiges Modell des Menschen als Informationsverarbeiter vor, das bisher allerdings vorwiegend für sehr einfach strukturierte Aufgabenszenarien angewendet wurde. Auf Grundlage dieses Modells wird der Prozess der Wahrnehmung und der

aus daraus folgenden Handlungen für komplexere Aufgabenfelder dergestalt systematisch beschrieben, dass Hinweise zur ergonomisch optimalen Gestaltung der technischen Hilfsmittel für Beobachtung und Handlung gefunden werden können.

Die Modellierung wird am Beispiel eines Szenarios aus der interaktiven, videogestützten Überwachung von Realweltszenen dargelegt.

- [1] The Model Human Processor - An Engineering Model of Human Performance. S. K. Card, T. P. Moran, A. Newell. In: Handbook of Human Performance, Vol. II (Cognitive Processes and Performance); R. Boff, L. Kaufman, J. P. Thomas (eds.). John Wiley & Sons, New York, 1986, pp. 45-1 - 45-35.

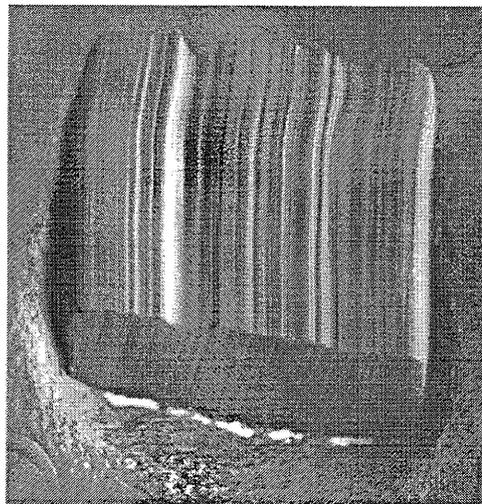
# Strategien für die automatisierte Auswertung von Spuren in der Kriminaltechnik

Michael Heizmann

Institut für Mess- und Regelungstechnik mit Maschinenlaboratorium  
Universität Karlsruhe (TH)  
Engler-Bunte-Ring 21  
76131 Karlsruhe  
Tel.: 0721/608-2338  
Fax: 0721/661874  
Email: Michael.Heizmann@mrt.uka.de

**Schlüsselwörter:** Kriminaltechnik, Mustererkennung, Korrelationsverfahren, automatische Sichtprüfung, Bildverarbeitung, Vergleichsverfahren, Werkzeugspuren, Schusswaffenspuren.

Für die effiziente Auswertung zahlreicher Arten von Werkzeugspuren in der Kriminaltechnik sind aufgrund der Menge des Spurenmaterials rechnergestützte Hilfsmittel für die automatisierte Erkennung von Ähnlichkeiten zwischen solchen Spuren unumgänglich. In der Realität auftretende Spuren sind häufig charakterisiert durch riefenartige Texturen, die vergleichbar einem Fingerabdruck einem bestimmten Werkzeugexemplar zugeordnet werden können, siehe Abb. 1. Diese charakteristischen, dem Werkzeugexemplar eigenen Merkmale ermöglichen eine zuverlässige Erkennung von Zusammenhängen zwischen unterschiedlichen Spuren.



*Abbildung 1: Beispiel einer riefenartigen Werkzeugspur*

Um die momentan übliche zeitaufwendige und fehleranfällige visuelle Inspektion von Werkzeugspuren zu vermeiden, sind geeignete Methoden zur Automatisierung der Spurenerfassung und -auswertung wesentlich. Vielversprechende Ansätze basieren auf der Extraktion von aussagekräftigen charakteristischen Merkmalen aus lichtmikroskopischen Bildern der zu untersuchenden Spuren.

In der Praxis spielen neben einer hohen Erkennungsrate die erforderliche Rechenzeit sowie die intuitive Interpretierbarkeit der Ergebnisse durch den Kriminaltechniker eine wichtige Rolle bei der Auswahl und Gestaltung adäquater Vergleichsstrategien.

Die in diesem Beitrag vorgestellten Verfahren auf der Grundlage der Kreuzkorrelationsfunktion liefern ein zuverlässiges quantitatives Maß für die Beurteilung der Ähnlichkeit zweier Spuren. Mit Hilfe angepasster Verfahren zur Vorverarbeitung von Spurenbildern lassen sich erhebliche Verbesserungen im Vergleich zum Stand der Technik realisieren. Es wird gezeigt, dass durch geeignete Berücksichtigung der Signalcharakteristika von Spuren die Erkennungsrate von derartigen Korrelationsverfahren deutlich verbessert werden kann, was durch quantitative Aussagen auf Basis statistischer Auswertungen bestätigt wird.

## Literatur:

- [1] M. Heizmann und F. Puente León: "Model-based analysis of striation patterns in forensic science". In: *Enabling Technologies for Law Enforcement and Security*, S.K. Bramble, E.M. Carapezza, L.I. Rudin (Hrsg.), Proceedings of SPIE 4232, S. 533–544, 2001.
- [2] F. Puente León und M. Heizmann: "Strategies to detect non-linear similarities by means of correlation methods", In: *Intelligent Robots and Computer Vision XX: Algorithms, Techniques, and Active Vision*, D.P. Casasent, E.L. Hall (Hrsg.), Proceedings of SPIE 4572, S. 513–524, 2001.
- [3] M. Heizmann: "Automatische Auswertung von Riefenspuren in der Kriminaltechnik". In: *Sensoren und Meßsysteme 2002*, Vorträge der 11. ITG/GMA Fachtagung, S. 375–378, VDE-Verlag, Berlin, 2002.
- [4] M. Heizmann: "Strategies for the automated recognition of marks in forensic science". In: *Investigative Image Processing II*, Z.J. Geradts, L.I. Rudin (Hrsg.), Proceedings of SPIE 4709, S. 68–79, 2002.

# Ein Verfahren zur video-basierten Identifikation von raumbezogenen Verkehrszustandsvariablen<sup>1</sup>

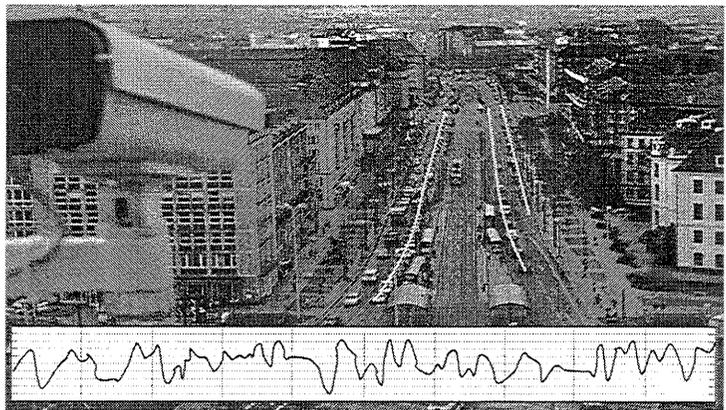
Dipl.-Ing. Klaus-Peter Döge  
Technische Universität Dresden  
Lehrstuhl für Verkehrsleitsysteme und  
Prozessautomatisierung

Andreas Schubert Strasse 23  
01069 Dresden  
Tel. (0351)463-36766  
doege@vina.vkw.tu-dresden.de

**Schlüsselwörter:** Tag- und Nacht-Bildauswertung, Stochastische Prozesse, mittlere räumliche Verkehrsstromgeschwindigkeit, Verkehrsdichte

In den zurückliegenden 5-10 Jahren sind mehrere Systeme zur video-basierten Verkehrszustandsidentifikation entwickelt worden. Typische Vertreter hierfür sind das System Vantage von Iteris [3], der Traficon Video Image Prozessor [1] und das System Autoscope der Firma Data Collect [2]. Mit der Weiter- und Neuentwicklung geeigneter Verfahren [4]-[9] und mit der Anwendung dieser Systeme [10]-[16] beschäftigt sich eine

große Anzahl von Veröffentlichungen. Die häufig eingesetzten Verfahren der Muster- und Kanten-detektion haben allerdings den Nachteil, bei gegenseitiger Überlappung der Fahrzeuge an Genauigkeit und Verlässlichkeit zu verlieren. Für dieses Problem will der vorliegende Beitrag einen neuartigen, auf der Analyse stochastischer Signale basierenden Lösungszugang schaffen. Ausgangspunkt ist das im Rahmen des BMBF-



*Virtuelle Messstrecken im Live-Kamera Bild und eine zugehörige Grauwertfunktion.*

Leitprojektes<sup>1</sup> „intermobil Region Dresden“ aufgebaute Live-Kamera System, das Echtzeitinformationen über die Belastungszustände des Straßennetzes aus dem Internet gestattet. Die derzeitige Ausbaustufe, die 17 Knotenpunkte zwischen Pirna im Südosten und der Königsbrücker Straße im Dresdener Norden umfasst befindet sich unter <http://www.dresden-info.fhg.de/> im öffentlichwirksamen Erprobungsbetrieb. Das Live-Kamera-System soll jedoch nicht nur Bilder über die aktuelle Verkehrssituation übermitteln. Angestrebt wird vielmehr ein intelligenter optischer Sensor mit dem sich über das Kamera-System auch wesentliche Zustandsgrößen des Straßenverkehrs schätzen lassen. Dafür werden hinreichend einfache und robuste Algorithmen zur Bildauswertung benötigt, die sich in die Kameraelektronik integrieren lassen.

Der Vortrag stellt hierfür ein neuartiges Verfahren vor. Die Tragfähigkeit des Lösungszugangs wird am Beispiel mehrerer lichtsignalgesteuerter Straßenzüge im Dresdner Stadtgebiet untersucht. Im Unterschied zu den aus der Literatur [1]-[9] bekannten Verfahren, welche zumeist Bildelemente wie Muster und Kanten auswerten, wird im vorliegenden Fall eine Grauwertfunktion entlang einer Messlinie ermittelt und analysiert. Die Abbildung illustriert die Vorgehensweise: In die zu untersuchende Fahrspur wird eine Messlinie gelegt. Deren Grauwerte über dem Pixelindex aufgetragen, ergeben das zu untersuchende

<sup>1</sup> Die diesem Beitrag zugrunde liegenden Forschungsergebnisse wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Vorhabens **intermobil Region Dresden** gewonnen (Förderkennzeichen 19B9907A8), Projektleiter: Prof. Dr.-Ing.habil.Dr.h.c. H. Strobel.

stochastische Signal. Durch geeignete Zentrierung wird hieraus ein diskreter, stationärer Zufallsprozess gewonnen. Damit stehen zur Auswertung die Methoden der digitalen Bildverarbeitung und der Theorie stochastischer Prozesse zur Verfügung. Die Signalvorverarbeitung beinhaltet darüber hinaus die Kontrasterhöhung und Entzerrung des Signals. Aus dem so veränderten Signal werden die „mittlere räumliche Verkehrsstromgeschwindigkeit“ und „Verkehrsdichte“ geschätzt. Die Nachbearbeitung umfasst die Glättung und die Gewinnung so genannter „*Level-of-Service Informationen*“, Reisezeiten und Änderungstendenzen. Aus dem nun bekannten Verkehrszustand werden bei Bedarf Empfehlungen zum Verschieben des Zeitpunktes des Antritts der Fahrt oder zum Umsteigen auf den öffentlichen Verkehr generiert. Das Verfahren hat seine Funktionsfähigkeit in verschiedenen Fallstudien im Stadtgebiet Dresden nachweisen können. Untersucht wurden dabei verschiedene Sichtbedingungen bei Tag und bei Nacht. Dabei konnten Staus mit Staubeginn, Stauzustand und Auflösung des Staus auch unter erschwerten Sichtbedingungen (starker Regen) detektiert werden. Die Anzahl der Messlinien pro Bild ist frei wählbar, so dass sich mehrere Spuren auswerten lassen. Auch Eigenschaften des ruhenden Verkehrs, z.B. Auslastung einer Parkspur sind ermittelbar. Das Verfahren wurde am 26.08.2002 zum Patent angemeldet [17].

### **Literatur (Auswahl):**

- [1] <http://www.traficon.com>
- [2] <http://www.DataCollect.de>
- [3] <http://www.iteris.com/>
- [4] Loos, Rolf. Verfahren zum Erkennen von Fahrzeugbewegungen und Verkehrsdichten in Verkehrsüberwachungsanlagen. Offenlegungsschrift DE 4128 312
- [5] Pöchmüller, Werner. Verfahren zur Bestimmung der Geschwindigkeit eines Fahrzeuges mit Hilfe einer das Fahrzeug aufnehmenden Videokamera und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens. Offenlegungsschrift DE 19517026 A1
- [6] Higashikubo, Masakatsu and Yoshiyuki Ito. Traffic Congestion Measuring Method and Apparatus and Image Processing Method and Apparatus. Patent No.: US 6188778 B1
- [7] Szepanski, Wolfram. Dynamische Verkehrsflussanalyse und – steuerung mittels Bilderkennung. Offenlegungsschrift 4105809 DE A1
- [8] Osamu, Shimizu. Image Type Vehicle Sensing Device. Patent Abstracts of Japan 07192191 A
- [9] Robbins, J.. Technique for estimation of displacement and/or velocity of objects in video scenes. Patent WO 80/01977
- [10] Toffin, Eric Gregory Pernot und Salah Bouzar. “Active Video Surveillance”. Traffic Technology International (Oct/Nov 2002): 28-30
- [11] Anderson, Craig A. “Video Vigilance”. Traffic Technology International (Oct/Nov 2002): 32-34
- [12] Sachse, Thomas. „Die Messwertqualität autarker Videosysteme am Beispiel des Traffic Eye Universal“. Strassenverkehrstechnik 9 (2002): 463-470
- [13] Ng, A.. “Change of Image”. Traffic Technology International (Dec2001/Jan 2002): 56-58
- [14] Warren, Paul und Mark E. Perry. “Image Consicuous”. Traffic Technology International (Aug/Sep 2002): 110-113
- [15] Middleton, Dan und Rick Parker. Vehicle Detection Workshop Participant Notebook. Texas Transportation Institute. June 2000
- [16] Tsatapalsidis, Dimitrios. Die Verwendung von Verkehrsdaten aus Videoerfassung als Steuerungsgrundlage von Verkehrsabhängigen Netzsteuerungen. Diplomarbeit am Institut für Strassen- und Verkehrswesen der Universität Stuttgart. 11/2000
- [17] Strobel, Horst und Klaus-Peter Döge. Verfahren und Anordnung zur Ermittlung von Verkehrszustandsgrößen. Patentanmeldung D7200292DE
- [18] Kienke, Uwe. Signale und Systeme. Wien: Oldenbourg Verlag, 1998.
- [19] Jähne, Bernd. Digitale Bildverarbeitung. 5.Auflage. Berlin: Springer Verlag, 2002.

# Steuerung von getriebeelastischen Robotern unter Verwendung von automatisch generierten, inversen Systemmodellen

M. Thümmel\*

J. Bals\*

\* Institut für Robotik und Mechatronik  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
82234 Weßling

Tel.: +49 (8153) 28-2428  
Fax: +49 (8153) 28-1441  
Email: michael.thuemmel@dlr.de

Tel.: +49 (8153) 28-2433  
Fax: +49 (8153) 28-1441  
Email: johann.bals@dlr.de

**Schlüsselwörter:** inverse Dynamik, Robotersteuerung, Roboter mit elastischen Gelenken

Aufgrund erhöhter Anforderungen an die Präzision von Robotern, die bei Trajektorienfolgeaufgaben wie z.B. das Laserschweißen gestellt werden, soll deren Folge- und Schwingungsverhalten durch den Einsatz moderner Steuerungs- und Regelungsmethoden verbessert werden. Es zeigt sich, dass sehr detaillierte Modelle benötigt werden um das Verhalten des Roboters in der geforderten Genauigkeit zu beschreiben. Damit stellt sich die Frage, wie diese Modelle beim Entwurf des Steuerungs- und Regelungssystems genutzt werden können.

Dem praktischen Einsatz einiger theoretisch vielversprechender, modellbasierter Methoden wie z.B. der Feedbacklinearisierung [1] sind bei Robotern enge Grenzen gesetzt, auch bei der hier betrachteten wichtigen Klasse von Robotern mit näherungsweise starren Armen und elastischen Antriebssträngen. Diese zeigen sich vor allem in Robustheitsproblemen und limitierter Rechenleistung. Deshalb werden überwiegend lineare Regler eingesetzt, die sich in der Anwendung als robust erwiesen haben [2][3].

In der vorliegenden Arbeit wird der Ansatz eines Steuerungs- und Regelungssystems mit zwei strukturellen Freiheitsgraden verfolgt, wie er in [4] für den Fall von linearen Systemen vorgestellt wurde. Die Aufgabe der Steuerung ist es dabei, über ein inverses Systemmodell das gewünschte Führungsverhalten zu erzielen. Dazu wird im Steuerungsentwurf möglichst viel vom nichtlinearen Modellwissen benutzt. Die Regelung hat dann im Idealfall nur noch die Aufgabe Stabilität, Störunterdrückung und Robustheit sicher zu stellen. Dies leisten auch verhältnismässig einfache, lineare Regler bei geringen Rechenzeiten. Als Vorteil der Struktur erweist sich die klare Trennung der Steuerungs- und Regelungskomponenten, die damit weitgehend unabhängig voneinander entworfen werden können.

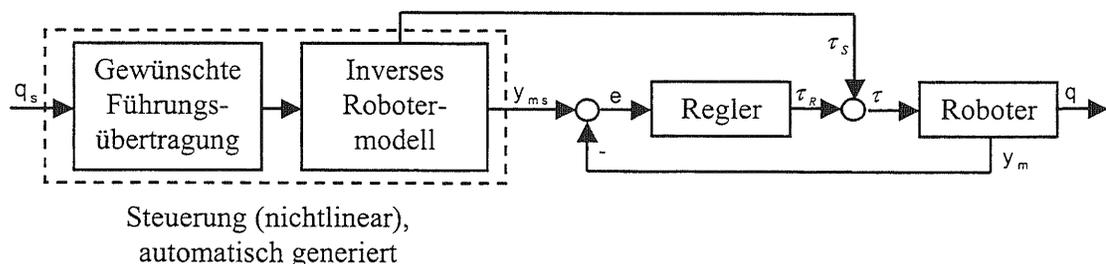


Abbildung 1

Um eine gute Trajektorienfolge zu ermöglichen, muss die Steuerung Sollwerte für alle Messgrößen sowie ein Vorsteuermoment berechnen. Dies entspricht der inversen Dynamik des Roboters mit elastischen Gelenken und einer vorgeschalteten Wunschübertragungsmatrix. Es zeigt sich, dass die Berechnung der Sollwerte für ausreichend detaillierte Robotermodelle sehr aufwändig wird. Der Grund dafür ist, dass DAEs integriert werden müssen und höhere Ableitungen der Systemgleichungen benötigt werden.

Im Vortrag wird gezeigt, dass die Trajektorienfolge von Robotern mit elastischen Antriebssträngen durch den Einsatz eines detaillierteren inversen Modells in der Steuerung deutlich verbessert werden kann. In dem Modell werden dabei sowohl die Antriebsstränge mit Reibungseffekten, nichtlinearem Steifigkeits- und Dämpfungsverhalten als auch die Mehrkörperdynamik des Roboters berücksichtigt. Ferner wird erläutert wie das Modell der inversen Dynamik automatisch generiert werden kann. Generell müssen dazu die analytisch zu differenzierenden Gleichungen ermittelt, die daraus resultierenden algebraischen Gleichungen erzeugt und das sich ergebende Gleichungssystem in Zustandsform umgeformt werden. Es zeigt sich, dass dazu vorhandenen Algorithmen zur Behandlung von DAEs, insbesondere der Pantelides Algorithmus [5] und die „Dummy Derivative Method“ [6] verwendet werden können.

Das Vorgehen wird anhand von Simulationen mit einem Modelica-Modell [7] eines 6-achsigen Roboters demonstriert, bei dem im inversen Systemmodell Ableitungen der Bewegungsgleichungen bis zur 8. Ordnung auftreten (Abbildung 2). Weiterhin werden experimentelle Ergebnisse für Positionieren und Bahnfahren präsentiert.

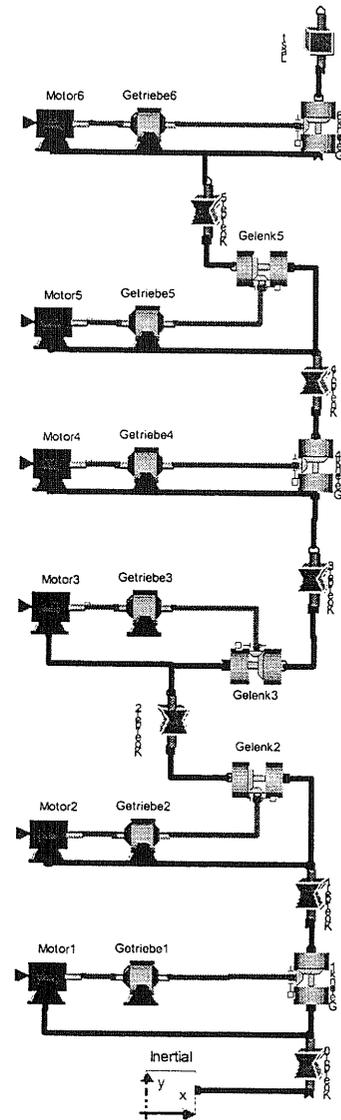


Abbildung 2

## Literatur:

- [1] A. De Luca; P. Lucibello: A general algorithm for dynamic feedback linearization of robots with elastic joints. IEEE Conference on Robotics and Automation, 504–510, 1998.
- [2] P. Tomei: A simple PD controller for robots with elastic joints. IEEE Transactions on automatic control, 36(10):1208–1213, 1991.
- [3] A. Albu-Schaeffer; G. Hirzinger: State feedback controller for flexible joint robots: A globally stable approach implemented on DLR's light-weight robots. IEEE Conference on Intelligent Robots and Systems, 2000.
- [4] G. Kreiselmeier: Struktur mit zwei Freiheitsgraden. Automatisierungstechnik at 6, 266–269, 1999.
- [5] C.C Pantelides: The consistent initialization of differential-algebraic systems. SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing, pages 213–231, 1988.
- [6] S.E. Mattsson; G. Söderlind: Index reduction in differential-algebraic equations using dummy derivatives. SIAM Journal of Scientific and Statistical Computing, 677–692, 1993.
- [7] Modelica-Homepage. <http://www.modelica.org/>, 2002

# Intelligente Blickwinkelsteuerung für visuell geführtes humanoides Gehen

Javier F. Seara

Günther Schmidt

Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik (LSR)  
Technische Universität München  
80290 München  
Tel.: +49-89-289-23405 Fax.: +49-89-289-28340  
<http://www.lsr.ei.tum.de>  
Email: javier.fernandez.seara@ei.tum.de

**Schlüsselwörter:** Blickwinkelsteuerung, autonome Navigation, humanoides Gehen

Das Forschungsgebiet humanoider Laufmaschinen hat in den letzten Jahren einen Zustand erreicht, in dem Konstruktion und Stabilisierung eines Laufroboters nicht mehr zu den zentralen Fragen der Forschung zu zählen scheinen. Gegenwärtig werden vor allem neuartige, praktische Anwendungsfelder untersucht. Die erfolgreiche Durchführung vieler anwendungsrelevanter Aufgaben erfordert jedoch ein bestimmtes Maß an autonomem Verhalten.

Autonome humanoide Navigation besteht darin, den Pfad des Roboters während der Fortbewegung vorzugeben und zu überwachen. Unabhängig von der eingesetzten Navigationsstrategie geht es stets darum, die Zielposition unter Vermeidung von Kollisionen mit Hindernissen zu erreichen. Navigation beinhaltet daher als zentrale Aufgaben die Selbstlokalisierung und Hindernisvermeidung, zu deren Lösung ein hohes Maß an Koordination zwischen Perzeption und Bewegungserzeugung notwendig ist. Dem entsprechend gehört diese Koordinationsaufgabe zu den derzeit am intensivsten untersuchten Fragestellungen [1,2].

Zur Durchführung einer Bewegungsaufgabe, d.h. zur sicheren Navigation, muss das Führungssystem einer visuell geführten Laufmaschine vorausschauend eine geeignete Schrittsequenz vorgeben. Informationen über ein Szenario, wie es beispielhaft Abb.1 zeigt, müssen dabei von einem aktiven Sichtsystem erfasst werden. Zur Erhöhung der Autonomie der Laufmaschine ist es schließlich notwendig, mit Hilfe intelligenter Maßnahmen ein Höchstmaß an aufgabenspezifischer Information zu gewinnen. Die Informationsakquisition und -verwaltung kann mit einer Steuerungsstrategie erreicht werden, die den Blickwinkel so einstellt, dass sich die momentan relevanten Objekte im beschränkten Blickfeld des Perzeptionssystems befinden.

Der vorliegende Beitrag beschreibt ein „*Information Management Scheme*“, das die Unsicherheiten, die mit den verschiedenen an der perzeptionsbasierten Fortbewegung beteiligten Prozesse berücksichtigt und verwaltet [3]. Zum Informations- und Unsicherheitsmanagement wird ein neues hybrides EKF eingesetzt. Die daraus entstehende Beschreibung der akkumulierten Informationen und Unsicherheiten der Messungen kann als Grundlage für die Auslegung einer aufgabenabhängigen Blickwinkelsteuerung dienen.

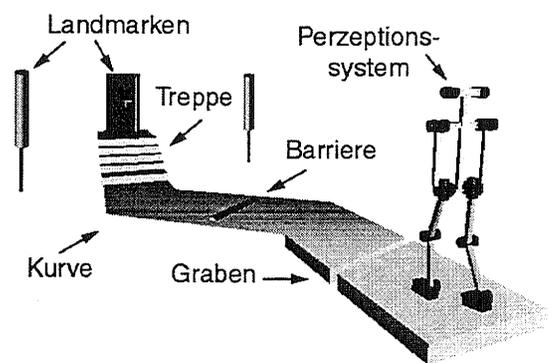


Abb.1: Laufroboter im Laufszenario

Der vorgestellte Ansatz zur Quantifizierung des Informationsgehalts beruht auf der Shannon'schen Informationstheorie. Information muss in diesem Zusammenhang neu definiert werden. Wir bezeichnen *Informationsgehalt* einer Blicksituation als Maß für die Verringerung der *Incertitude*, die hier anstelle des Begriffs Unsicherheit verwendet wird. *Incertitude* ist definiert als Maß für die Unsicherheit in Bezug auf den Gesamtumfang des verlässlichen Wissens, das zur Aufgabenerfüllung benötigt wird. Auf Grundlage des so definierten Konzeptes wird ein biologisch inspirierter Ansatz zur Blickwinkelsteuerung hergeleitet, der den prädierten Informationsgehalt maximiert. Die zentrale Vorgehensweise ist dabei, mit Hilfe der gewonnenen Umgebungsinformation, der momentanen Lage des Perzeptionssystems, der Bewegungsparameter und der momentan anstehenden Aufgabe die optimale Ausrichtung des Perzeptionssystems für die nachfolgende Blicksituation zu bestimmen.

Wie bereits erwähnt ist es eines der wichtigsten Ziele der Navigation, einem vorgegebenen Pfad zu folgen und dabei die Zielposition zu erreichen. Dazu ist es notwendig, die Unsicherheiten bezüglich der Selbstlokalisierung so gering wie möglich zu halten. Diese Unsicherheiten beziehen sich auf die absolute Lage der Laufmaschine, die zur Navigation, d.h. zur Pfadplanung und -korrektur, notwendig ist. Das Perzeptionssystem muss dazu die Objekte verfolgen, deren Position in der Welt am genauesten bekannt sind, etwa Landmarken. Hierbei müssen die Lageunsicherheiten des Roboters durch geeignete Informationsgewinnung so gering wie möglich gehalten werden. Die zweitwichtigste Aufgabe sicherer Fortbewegung ist die Vermeidung von Kollisionen mit in der Umgebung befindlichen Hindernissen. Dabei hängt die Relevanz eines Hindernisses davon ab, in wie weit es ein Risiko für die Erfüllung der Bewegungsaufgabe darstellt. Auf einem gegebenen Pfad durch ein Szenario mit verschiedenen Hindernissen gibt es Punkte, an denen die Gefahr einer Kollision mehr oder weniger groß ist. Die Blickwinkelsteuerung muss daher das Risiko einer Kollision an diesen Punkten minimieren, was ebenfalls als *Incertitude* dargestellt werden kann. Autonome Fortbewegung wird schließlich sichergestellt, in dem die Ergebnisse der Selbstlokalisierung und der Hindernisvermeidung durch Definition einer optimalen Entscheidungsstrategie zusammengeführt werden. Die Frage „Wohin schaue ich als nächstes?“, um beide Navigationsaufgaben in optimaler Weise zu lösen, wird durch gleichzeitige Minimierung der Selbstlokalisierungs- und der Hindernisvermeidungs-*Incertitude* beantwortet. Dabei stellt die Entscheidungsaufgabe ein Action/Selection-Problem dar [4], bei dem ein Blickwinkel unter Berücksichtigung zweier unterschiedlich garteter und möglicherweise konkurrierender Zielstellungen ausgewählt werden muss.

## Literatur:

- [1] O. Lorch, A. Albert, J. Denk, M. Gerecke, R. Cupec, J. F. Seara, W. Gerth, and G. Schmidt. Experiments in Vision-guided Biped Walking. In *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 2484-2490, Lausanne, Switzerland, Oct. 2002.
- [2] H. Inoue. Explorations of Human Robot Applications. In *Proc. of the IEEE/RAS Int. Conf. on Humanoid Robots (Humanoids)*, pp. 497-499, Tokio, Japan, Nov. 2001.
- [3] J. F. Seara, K. H. Strobl, and G. Schmidt. Information Management for Gaze Control in Vision Guided Biped Walking. In *Proc. of the IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp. 31-36, Lausanne, Switzerland, Oct. 2002.
- [4] Mark Humphrys. Action Selection Methods using Reinforcement Learning. PhD Thesis. Trinity Hall, Computer Laboratory, University of Cambridge, June 1997.

# Sliding-Mode-Folgeregelung gliedflexibler Roboter am Beispiel eines mehrgliedrigen Manipulators

Dadi Hisseine

Professur für Steuerung, Regelung und Systemdynamik  
Gerhard-Mercator-Universität Duisburg  
47048 Duisburg  
Tel.: 0203 379 3416  
Fax: 0203 379 3027  
Email: hisseine@uni-duisburg.de

Flexible Roboter gehören zur Klasse mechanischer Systeme, die mehr Freiheitsgrade als vorzuziehende Stellgrößenkomponenten besitzen. Daher ist eine Reihe von Schwierigkeiten zu verzeichnen, was die Lösung des Trajektorienfolgeproblems angeht. Bezüglich der Lage des Endeffektors weisen gliedflexible Roboter eine instabile Nulldynamik auf. Um dem Hindernis der inhärenten Nichtminimalphasigkeit zu begegnen und den negativen Einflüssen der auftretenden Elastizitäten entgegenzuwirken sind moderne Regelungskonzepte auf der Basis einer vollständigen Systembeschreibung notwendig.

Da die Modellierung gliedflexibler Roboter in der Regel zu partiellen Differentialgleichungen führt, gibt es neben den exakten Lösungsansätzen, die sich direkt mit den partiellen Differentialgleichungen befassen, auch Näherungsmethoden, die auf bewährten Ansätzen zur Diskretisierung der verteilten Verformungskordinaten beruhen. Zu den Quellen parametrischer Unsicherheiten können, neben den Nutzlastvariationen, u.a. die bei der approximativen Modellbeschreibung festzulegenden Annäherungen gehören, die eventuell fehlerhafte Änderungen der dynamischen Systemgleichungen verursachen können. Einen möglichen Weg sich mit solchen Unsicherheiten zu befassen bietet die Sliding-Mode-Methodik: ein effizientes Werkzeug zur Regelung von „unsicheren“ nichtlinearen dynamischen Systemen. Um das (dem Sliding-Mode) inhärente Chattering-Problem zu beseitigen existieren „glättende“ Mechanismen, womit „geglättete“ Lösungen erzielt werden.

Ausgehend von den nichtlinearen, durch modale Analyse entstandenen Systemgleichungen wird im Rahmen dieses Vortrags eine auf einer Sliding-Mode-Strategie basierende, nichtlineare Trajektorienfolgeregelung für einen mehrgliedrigen flexiblen Roboterarm vorgestellt. Mittels Simulationsstudien werden u.a. die Tracking-Eigenschaften und die Robustheit des vorgestellten Regelungskonzepts aufgezeigt.

**Schlüsselwörter:** Robuste Trajektorienfolgeregelung, Sliding-Mode-Regelung, Gliedflexible Roboter.

## Literatur:

- [1] W.J. Book. Recursive Lagrangian Dynamics of flexible manipulator arms. Int. J. of Robotics Research, 3, 87-101, 1984.
- [2] D. Hisseine. Nichtlineare robuste Regelung mit Anwendung auf gliedflexible Roboter. VDI Verlag, Düsseldorf, Fortschr. Ber. Reihe 8, Nr. 950, 2002.
- [3] V.I. Utkin. Sliding modes in control and optimization. Springer-Verlag, Berlin, 1992.

# Multiraten-Abtastregelung mechatronischer Systeme am Beispiel einer kaskadierten Antriebsregelung

J. Winkelhake

U. Konigorski

Institut für Elektrische Informationstechnik  
 Technische Universität Clausthal  
 Leibnizstraße 28  
 Tel.: +49-05323-72-2764  
 Fax.: +49-05323-72-3197  
 {winkelhake, konigorski}@iei.tu-clausthal.de

**Schlüsselwörter:** Abtastsysteme, Interpolation, Kaskadenregelung, Multiraten, E-GAS

Die große Mehrzahl technischer Regelungen werden heute digital, mit Mikrocontrollern oder Digitalen Signal Prozessoren (DSPs) ausgeführt. So wurde erst durch den Einsatz digitaler Signalverarbeitungen und Steuerungen die sinnvolle Anwendung moderner Regelungstheorien auf reale Mehrgrößensysteme ermöglicht und auf den Weg zum zukünftigen Stand der Technik gebracht [1,2]. Um diese Entwicklung weiter zu fördern, ist es jedoch erforderlich, die Effizienz der Abtastregelungen hinsichtlich Rechenzeitbedarf und Flexibilität bei der Synthese zu verbessern. Ein entscheidender Weg zu diesem Ziel wird hier mit sogenannte Multiraten (MR)- Regelungen, d.h. durch die Verwendung mehrere Abtastfrequenzen in einem Regelkreis, vorgeschlagen und verfolgt [3].

Bei der näheren Betrachtung eines Abtastsystems, welches in Abbildung 1 beispielhaft dargestellt ist, zeigt sich, dass ein MR-Ansatz insbesondere im Mehrgrößensystem sinnvoll ist [4]. Dies resultiert aus den Kriterien, welche die Wahl der Abtastrate der Messgrößen bzw. der Taktfrequenz der Halteglieder bestimmen. So sollten die Abtastraten  $T_{a_j}$  der Ausgangsgrößen  $y_j(t)$  mit  $j=1\dots p$  in erster Linie anhand der bandbegrenzten Signal- bzw. Systemdynamik gewählt werden,

in der Praxis werden sie jedoch häufig durch die Grenzfrequenz der verwendeten Messgeräte beschränkt. Die Taktfrequenz  $T_{e_i}$  der Halteglieder mit  $i=1\dots m$  am Systemeingang wird hingegen durch die Rechenleistung des Mikrocontrollers bzw. DSPs begrenzt. Um Echtzeitbetrieb und damit die sichere Funktion der Recheneinheiten gewährleisten zu können, müssen diese die gesamte Taskmenge in einem Zeittakt  $T_{e_i}$  abgearbeitet haben.

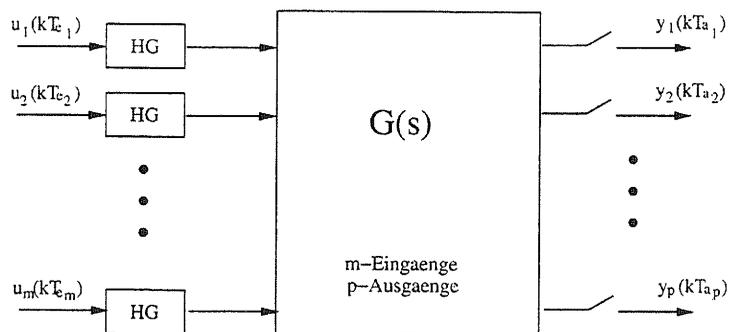


Abbildung 1: Allgemeine Struktur eines linearen Multiraten Mehrgrößensystems

Aufgrund dieser verschiedenen Kriterien zur Abtast- und Taktfrequenzwahl kann bereits im Eingrößenfall ein MR-Entwurf sinnvoll sein, wenn zum Beispiel besondere Messbeschränkungen vorliegen [5]. Im Mehrgrößensystem ist er hingegen kaum zu vermeiden, falls die Effizienz der Regelung hinsichtlich des Rechenzeitbedarfs beim Entwurf berücksichtigt werden muss. Dies ist bei industriell eingesetzten Reglern, insbesondere bei Komponenten mit höheren Stückzahlen immer der Fall und bestimmt die Gesamtkosten des Produkts wesentlich.

In diesem Beitrag werden daher verschiedene Methoden zur Diskretisierung eines MR-Systems im Zeit- und Frequenzbereich vorgestellt, wobei grundsätzlich zwischen den diskreten Beschreibungen im Basiszeitraster  $T_B$  und im Rahmenzeitraster  $T_R$  unterschieden werden kann [6]. Diese elementaren Zeitraster  $T_B$  und  $T_R$  eines MR-Systems sind formal durch

$$T_B = ggT(T_{ei}, T_{aj})$$

$$T_R = kgV(T_{ei}, T_{aj}) \quad , \text{mit } i=1\dots m, j=1\dots p$$

definiert. Vor- und Nachteile der verschiedenen Methoden werden erläutert und Syntheseverfahren abgeleitet. Hierbei ist als hervorzuhebende Besonderheit der MR-Systeme die erforderliche Abtastratenwandlung, bzw. Interpolation zu berücksichtigen, die als zusätzlicher Freiheitsgrad bei der Reglersynthese genutzt werden kann. Regelungstechnisch sinnvolle Interpolationsverfahren werden daher vorgestellt und in eine Kaskadenregelung mit zwei unterschiedlichen Abtastfrequenzen zur Lageregelung eines Direktantriebs implementiert.

Bei diesem Fallbeispiel handelt es sich um eine direktangetriebene E-GAS Drosselklappe (Abbildung 2), welche hohe Regelungsanforderungen an Genauigkeit, Dynamik und Dämpfung des geschlossenen Regelkreises stellt und zudem starken Beschränkungen hinsichtlich der verfügbaren Rechenzeit unterworfen ist. Die direktangetriebene E-GAS Drosselklappe eignet sich aus diesen Gründen sehr gut zur Demonstration der Leistungsfähigkeit moderner MR-Regelungen. Der erhöhte Synthesaufwand beim Entwurf einer MR-Regelung wird durch eine verbesserte Regelgüte bei gleichzeitig deutlich reduzierter Rechenbelastung des Mikrocontrollers mehr als gerechtfertigt und die Effizienz der Regelung damit erhöht.

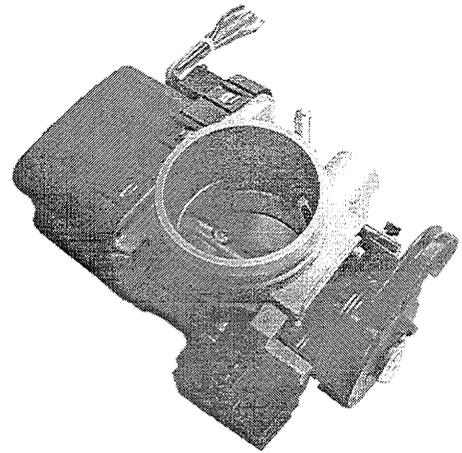


Abbildung 2: E-GAS Drosselklappe mit Direktantrieb

## Literatur:

- [1] Isermann, R.: *Digitale Regelungssysteme*, Springer Verlag New York, 1988.
- [2] Föllinger, O.: *Lineare Abtastsysteme*, Oldenbourg Verlag München, Wien, 1985.
- [3] Fliege, J.: *Multiraten-Signalverarbeitung: Theorie und Anwendung*, Teubner Verlag Stuttgart, 1993.
- [4] Meyer, David G.: *A Parametrization of Stabilizing Controllers for Multirate Sampled-Data Systems*, IEEE Transactions on Automatic Control, Vol.35, No.2, February 1990.
- [5] Gu, Yuping: *Multi-rate Digital Control and Signal Processing: Theory and Applications to Motion Control Systems*, Dissertation, Univ. of California, Berkeley, 2000.
- [6] Tornero, J., Armesto, L. *Applying Multi-Rate Modelling Techniques*, Proceedings WSEAS ISPR Conference, Cadiz, 06/2002.

# Das Zusammenspiel zwischen der Abstimmung der Systemdynamik und der Konstruktion während des Entwurfs mechatronischer Systeme am Beispiel einer vollaktiven, integrierten Radaufhängung

Prof. Dr.-Ing. Joachim Lückel \*

Dipl.-Ing. Thorsten Koch \*\*  
Dipl.-Ing. Jewgenij Harchenko \*\*

\* Mechatronik Laboratorium Paderborn (MLaP)  
Universität Paderborn  
Pohlweg 98  
Tel. 05251-60-5580  
Fax 05251-60-5574  
Joachim.Lueckel@mlap.de

\*\* Mechatronik Laboratorium Paderborn (MLaP)  
Universität Paderborn  
Pohlweg 98  
Tel. 05251-60-5572  
Fax 05251-60-5574  
Thorsten.Koch@mlap.de

## Schlüsselwörter:

Entwurfsmethoden, innovative mechatronische Systeme, computergestützte Produktentwicklung

## Kurzfassung:

Unter dem starken Einfluss der raschen Entwicklung der digitalen Rechentechnik ist auch die Mechatronik in einem ständigen Fluss. Aufgrund des großen Innovationspotenzials werden in Zukunft – um die Attraktivität von Produkten weiter zu steigern – immer mehr mechatronische Komponenten zu einem komplexen Gesamtsystem verkoppelt. So kann durch die Kombination von mechanischen Tragstrukturen mit krafteinleitenden Aktoren, Sensoren und Informationsverarbeitung das dynamische Verhalten aktiv beeinflusst und optimal abgestimmt werden.

Für die Entwicklung technischer Produkte sind heute in der Praxis zu einem großen Teil erfahrene und anschaulich arbeitende Konstrukteure verantwortlich. Bei den angewendeten Entwurfsmethoden wird häufig die Gestalt in den Mittelpunkt gestellt, und in der Regel beginnt der Konstruktionsprozess mit der Erstellung von konstruktiven Entwürfen in Form von Skizzen und Zeichnungen. Hieran schließt sich eine überschlägige Auslegung des Systems mit Unterstützung vereinfachter Berechnungs- und Auslegungsverfahren an. Die Auslegung von Regelung und Steuerung erfolgt üblicherweise am realen Produkt bzw. am Prototypen. In einem iterativen, langwierigen "trial and error"-Verfahren werden am realen System so lange Modifikationen vorgenommen, bis das Produkt die Anforderungen erfüllt.

Eine derartige Vorgehensweise ist zur Entwicklung hochdynamischer mechatronischer Systeme nicht geeignet. Hier muss die Funktion des mechatronischen Produktes, statt der Gestalt, in den frühen Phasen des Entwurfsprozesses in den Mittelpunkt gerückt werden. Nach den Vorstellungen des MLaP sind bei dem Entwurf mechatronischer Systeme die funktionsorientierte, ganzheitliche Betrachtung aller Systemkomponenten, die modellbasierte Auslegung und die Berücksichtigung der verteilten Realisierung während der frühen Phasen zwingend notwendig (vgl. [1]).

Für die Auslegung der Bewegungsfunktionen entstanden am MLaP Entwurfsmethoden, welche die Vorstellungen der Konstruktionssystematik aufgreifen, bei denen aber die ganzheitliche Betrachtung mit der Abbildung des Systems im Rechner im Mittelpunkt steht. Im Rahmen dieses Beitrags sollen die Elemente der Entwurfsmethodik – von den frühen Phasen bis zur Inbetriebnahme – am Beispiel eines integrierten Radmoduls dargestellt

werden, das am MLaP im Modellmaßstab aufgebaut wird (siehe Abbildung 1). Dieses Radmodul ist die vitale Komponente eines neuen, innovativen Verteilerfahrzeugs, dessen Konzept im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Projekts erarbeitet wurde. Dieser Servicezubringer soll innerhalb der Innenstädte den Fracht-Container flexibel transportieren (vgl. [2]).

Die Haupteigenschaften des Moduls sind:

- direkter Radantrieb (Antrieb mittels eines DC-Elektromotors in der Radnabe),
- neuartiges Lenkmodul: Die Lenkbewegung wird durch das Zusammenwirken von Antrieb und einer elektro-mechanischen Bremse erzielt,
- aktive Federung (Regelung der Aufbaudynamik),
- 32-bit PowerPC MPC555 als CPU-Modul mit Ankopplung an einen FPGA-Baustein (vgl. [3]).

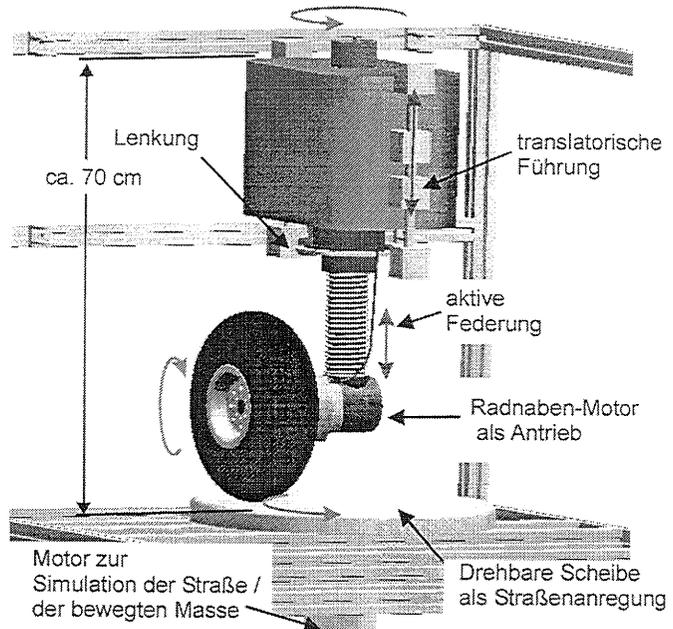


Abbildung 1: CAD-Konstruktion des Radmoduls

Während des Entwurfs des Radmoduls erfolgte im Anschluss an die Definition des

Lastenhefts die Formulierung der Systemfunktionen. In Anlehnung an die Struktur der Funktionen ergab sich daraus die Systemstruktur des Fahrzeugs. Im Anschluss daran wurden für die einzelnen Teilsysteme Lösungsprinzipien gesucht, die modellbasiert im Rechner analysiert worden sind. Bei der rechnergestützten Auslegung galt es, das gesamte System ganzheitlich zu betrachten, indem während der Analyse und der Optimierung sowohl die konstruktiven Anteile als auch die Aktorik/Sensorik und die Informationsverarbeitung gleichermaßen ausgelegt wurden.

Bei dieser Arbeitsphase kam das am MLaP entwickelte Software-Tool CAMEL-View zum Einsatz (vgl. [4]). Dieses Programm unterstützt den Anwender bei der Entwicklung mechatronischer Systeme vom Entwurf bis hin zur Realisierung unter Echtzeitbedingungen.

## Literatur:

- [1] Lückel, J.; Koch, T.; Schmitz, J.: Mechatronik als integrative Basis für innovative Produkte. Mechatronik – Mechanisch / Elektrische Antriebstechnik, VDI-Verlag, Düsseldorf, 2000.
- [2] Koch, T.; Zanella, M.; Schmitz, J.: X-mobile - erste physikalische Realisierung eines innovativen Stadtzubringerfahrzeugs. VDI Mechatronik, Innovative Produktentwicklungen, Frankenthal, 2001.
- [3] Zanella, M.; Robrecht, M.; Lehmann, T.; Gielow, R.; de Freitas Francisco, A.; Horst, A.: RABBIT: A Modular Rapid-Prototyping Platform for Distributed Mechatronic System, SBCCI 2001, XIV Symposium on Integrated Circuits and Systems Design, Brasília, 2001.
- [4] Meier-Noe, U., Hahn, M.: Entwicklung mechatronischer Systeme mit CAMEL, 3. Workshop Transmechatronik, Fachhochschule Niederrhein, Krefeld, 1999.

# Sind nichtlineare prädiktive Regler robust?

Rolf Findeisen

Frank Allgöwer

Institut für Systemtheorie technischer Prozesse

Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart

Tel: 0711/685 7748

Tel: 0711/685 7733

Fax: 0711/685 7735

Fax: 0711/685 7735

[findeise@ist.uni-stuttgart.de](mailto:findeise@ist.uni-stuttgart.de)

[allgower@ist.uni-stuttgart.de](mailto:allgower@ist.uni-stuttgart.de)

**Schlüsselwörter:** Nichtlineare prädiktive Regelung, Stabilisierung, Robustheit, Rechenzeitverzögerungen

In den letzten Jahren hat sich die prädiktive Regelung insbesondere in der Prozessindustrie als eines der erfolgreichsten gehobenen Regelungsverfahren herauskristallisiert [1,2]. Die heutigen industriell eingesetzten prädiktiven Regler verwenden fast ausschließlich lineare Prozessmodelle zur Prädiktion, da für diese u.a. die notwendigen wiederholten Echtzeit-Optimierungen sehr effizient durchgeführt werden können. Stetig steigende Anforderungen an die Regelgüte erfordern jedoch immer häufiger die Verwendung detaillierter nichtlinearer Modelle für die Prädiktion des dynamischen Verhaltens. Dies hat in den letzten Jahren zu einem stark steigenden Interesse an der *nichtlinearen prädiktiven Regelung* (NMPC) geführt.

So wurden unter anderem im vergangenen Jahrzehnt eine Reihe von nichtlinearen prädiktiven Regelungsverfahren entwickelt, welche die Stabilität des geschlossenen Kreises im nominellen Fall garantieren können [3,4,5,6]. Neben diesen nominellen Ergebnissen gibt es auch erste Ansätze für robuste nichtlineare prädiktive Regelungsverfahren, welche trotz auftretender, quantifizierbarer Modellfehlern die Stabilität des geschlossenen Kreises garantieren können [7,8,9,10]. Diese Verfahren basieren jedoch zumeist auf einer min-max Formulierung des zu lösenden Optimierungsproblems, für welche eine numerisch Lösung normalerweise sehr rechenintensiv ist und somit den praktischen Einsatz erschwert. Im Rahmen dieses Beitrages soll untersucht werden, unter welchen Bedingungen nominell stabile nichtlineare prädiktive Regelungsverfahren inhärente Robustheitseigenschaften besitzen.

Im ersten Teil des Beitrages wird ein Überblick über die existierenden Robustheitsergebnisse für die NMPC Regelung gegeben. Diese Ergebnisse sind jedoch nur unter sehr speziellen, einschränkenden Bedingungen gültig. Deshalb werden neue, allgemeine gültigere Robustheitsresultate und Bedingungen angegeben unter denen NMPC Regler robust gegenüber hinreichend kleinen Modellfehlern im Driftvektorfeld, Ausgangsstörungen, numerischen Optimierungsfehlern sowie nicht berücksichtigten Aktuatordynamiken sind. Diese Resultate bieten zum Beispiel eine Basis zur Entwicklung prädiktiver Ausgangsregelungsverfahren [11,12,13] und erlauben eine theoretische Untermauerung des so genannten Echtzeititerationsschemas [14] für die NMPC Regelung, bei dem zu jedem Abtastzeitpunkt das dynamische Optimierungsproblem nicht exakt gelöst wird.

Im zweiten Teil des Vortrages beschäftigen wir uns mit einem speziellen, unmittelbar mit dem praktischen Einsatz der prädiktiven Regelung verknüpften „Robustheitsproblem“. Das Prinzip der prädiktiven Regelung sieht eine wiederholte Online-Berechnung der optimalen Steuerung zu festen „Abtastzeitpunkten“ vor. Im Fall der linearen prädiktiven Regelung kann die hierfür notwendige Rechenzeit meist vernachlässigt werden. Im Gegensatz hierzu muss für die NMPC Regelung zu jedem Abtastzeitpunkt ein nichtlineares, nichtkonvexes Optimie-

rungsproblems gelöst werden, wofür eine nicht zu vernachlässigende Berechnungszeit benötigt wird. Zwischen den „Abtastzeitpunkten“ wird das sich jeweils ergebende optimale Eingangssignal als Steuerung auf den Prozess aufgeschaltet – wegen der unvermeidlichen Berechnungszeit zumeist mit einer Abtastperiode Verzögerung. Die große Mehrzahl der bekannten NMPC Verfahren mit garantierter Stabilität berücksichtigen diese Verzögerungen zwischen dem Beginn der Berechnung des optimalen Steuersignals und dem Aufschalten der berechneten Lösung auf den Prozess nicht. Dies führt im Allgemeinen zu Einbußen in der Regelgüte und die nominell geführten Stabilitätsbeweise sind für die praktische Implementierung nicht mehr gültig. In Rahmen dieses Beitrages zeigen wir, dass es möglich ist die notwendigen Berechnungszeiten explizit in den Beweisen der garantierten Stabilität zu berücksichtigen und geben Bedingungen an unten welchen die nominelle Stabilität des geschlossenen Kreises garantiert werden kann.

Abschließend zeigen wir auf, dass auch im Fall der expliziten Berücksichtigung der Berechnungszeiten die aufgezeigten inhärenten Robustheitseigenschaften der NMPC Regelung erhalten bleiben.

Die präsentierten Ergebnisse werden anhand einfacher Beispielsysteme verdeutlicht.

### Literatur:

- [1] S.J. Qin und T.A. Badgwell. An overview of nonlinear model predictive control applications. In F. Allgöwer und A. Zheng (Hrsg.), *Nonlinear Predictive Control*: 369-393. Birkhäuser, 2000.
- [2] M. Morari und J.H. Lee. Model predicitive control: Past, present and future. *Comp. and Chem. Eng.*, 23(4/5):667-682, 1999.
- [3] D.Q. Mayne, J.B. Rawlings, C.V. Rao, und P.O.M. Scokaert. Constrained model predictive control: stability and optimality. *Automatica*, 26(6):789-814, 2000.
- [4] F. Allgöwer, T.A. Badgwell, J.S., J.B. Rawlings und S.J. Wright. Nonlinear predictive control and moving horizon estimation: An introductory overview. In P. M. Frank (Hrsg.), *Advances in Control, Highlights of ECC'99*: 391-449. Springer, 1999.
- [5] G. De Nicolao, L. Magni und R. Scattolini. Stability and robustness of nonlinear receding horizon control. In F. Allgöwer und A. Zheng (Hrsg.), *Nonlinear Predictive Control*: 3-23. Birkhäuser, 2000.
- [6] R. Findeisen und F. Allgöwer. The quasi-infinite horizon approach to nonlinear model predictive control. In A. Zinober und D. Owens (Hrsg.), *Nonlinear and Adaptive Control, Lecture Notes in Control and Information Sciences*: 89-105, Berlin, 2002. Springer-Verlag.
- [7] M. V. Kothare, V. Balakrishnan und M. Morari. Robust constrained model predictive control using linear matrix inequalities. *Automatica*, 32(10):1361-1379, 1996.
- [8] H. Chen, C.W. Scherer und F. Allgöwer. A game theoretic approach to nonlinear robust receding horizon control of constrained systems. In *Proc. Amer. Contr. Conf.*: 3073-3077, Albuquerque, 1997.
- [9] S. Lall und K. Glover. A game theoretic approach to moving horizon control. In D. Clarke (Hrsg.), *Advances in Model-Based Predictive Control*. Oxford University Press, 1994.
- [10] L. Magni, H. Nijmeijer und A.J. van der Schaft. A receding-horizon approach to the nonlinear  $H_\infty$  control problem. *Automatica*, 37(5):429-435, 2001.
- [11] R. Findeisen, L. Imsland, F. Allgöwer, und B.A. Foss. Output feedback stabilization for constrained systems with nonlinear model predictive control. Zur Veröffentlichung angenommen im *Int. J. Rob. Nonl. Cont.*, 2002.
- [12] Imsland, R. Findeisen, E. Bullinger, F. Allgöwer, und B.A. Foss. A note on stability, robustness and performance of output feedback nonlinear model predictive control. Zur Veröffentlichung angenommen im *J. Proc. Contr.*, 2002.
- [13] R. Findeisen, L. Imsland, F. Allgöwer, und B.A. Foss. Output feedback nonlinear predictive control - a separation principle approach. In *Proceedings of 15th IFAC World Congress*, 2002.
- [14] M. Diehl, R. Findeisen, Z. Nagy, H.G. Bock, J.P. Schlöder, und F. Allgöwer. Real-time optimization and nonlinear model predictive control of processes governed by differential-algebraic equations. *J. Proc. Contr.*, 4(12):577-585, 2002

# Flachheitsbasierte Folgeregelung von Systemen mit verteilten Parametern mittels Randeingriff

Dipl.-Ing. Thomas Meurer

Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Michael Zeitz

Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9  
Tel. 0711-685-6568  
Fax 0711-685-6371  
Email {meurer, zeitz}@isr.uni-stuttgart.de

**Schlüsselwörter:** Flachheit, Trajektorienplanung, Vorsteuerung, Regelung, Systeme mit verteilten Parametern

Der Entwurf einer Folgeregelung zwischen stationären Arbeitspunkten von linearen und nichtlinearen Ausgleichsprozessen stellt aufgrund der Unendlichdimensionalität der zugrundeliegenden Gleichungen eine schwierige Regelungsaufgabe dar. Für lineare Systeme kann diese Aufgabe mit den klassischen Methoden der Greenschen Funktion bzw. modalen Transformation gelöst werden. Die Behandlung schwach nichtlinearer Modelle gestaltet sich ungleich schwieriger, erlaubt jedoch unter bestimmten Annahmen eine Lösung mit Hilfe eines formalen orts- und zeitabhängigen Potenzreihenansatzes.

Für endlich-dimensionale nichtlineare Systeme hat sich die Eigenschaft der differentiellen Flachheit [1,7] als eine besonders geeignete Basis für Analyse und Entwurf von Steuerung und Folgeregelung erwiesen. Die Erweiterung des Konzepts auf unendlich-dimensionale Systeme mit Randeingriff ist bislang auf den Entwurf einer reinen Steuerung beschränkt. Im Fall von Ausgleichsprozessen, d.h. parabolischer Systeme mit verteilten Parametern (SVP) erfolgt die Parametrierung der Systemzustände und Eingänge durch einen flachen Ausgang mittels der Formulierung eines *inversen Problems*. Zu dessen Lösung kann ein formaler Potenzreihenansatz in der Ortskoordinate mit zeitvarianten Koeffizienten verwendet werden. Die parametrisierten Eingänge (inverses Modell) lassen sich zur Trajektorienplanung für den flachen Ausgang und den Entwurf einer Vorsteuerung verwenden. Bisherige Anwendungen betreffen die lineare Wärmeleitungsgleichung [2], allgemeinere parabolische SVP [3,6] sowie nichtlineare Rohrreaktormodelle [8].

Aufgrund des Einflusses von Störungen sowie möglichen Modellfehlern und Modellunsicherheiten ist jedoch die Anwendbarkeit einer reinen Steuerung eingeschränkt bzw. für instabile SVP nicht möglich. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit einer stabilisierenden Regelung im geschlossenen Kreis, die für unendlich-dimensionale Systeme bislang noch nicht mit den Methoden der differentiellen Flachheit untersucht wurde.

In diesem Beitrag wird ein Ansatz zur flachheitsbasierten asymptotischen Folgeregelung parabolischer SVP vorgestellt. Die Methodik basiert auf einer Neuinterpretation

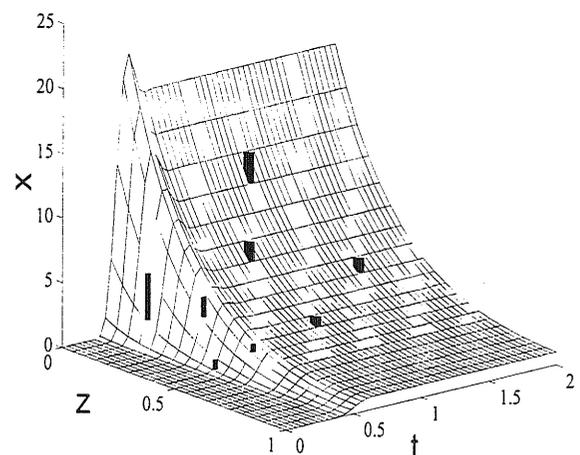


Abbildung. 1: Temperaturprofil des Wärmeleiters für Regelung der Randtemperatur  $x(1,t)$  über Randeingriff  $u = \partial x / \partial z(0,t)$ .

des zur Flachheitsanalyse verwendeten Potenzreihenansatzes und erlaubt die Herleitung eines flachen Regler- bzw. Beobachterentwurfsmodells endlicher Dimension [4,5]. Dies ermöglicht den Entwurf einer Vorsteuerung und Folgeregelung für das ursprünglich unendlichdimensionale System anhand des selben Modells. Der vorgeschlagene Ansatz wird am Beispiel der Folgeregelung der Randtemperatur an der Stelle  $z=1$  eines linearen Wärmeleiters über einen Randeingriff mittels eines Wärmestroms für  $z=0$  illustriert (Abb. 1). Simulationsstudien bestätigen die Robustheit der entworfenen flachheitsbasierten Folgeregelung mit Beobachter (Abb. 2) gegenüber Störungen und Modellfehlern sowie deren Anwendbarkeit zur Stabilisierung instabiler Arbeitspunkte. Der vorgeschlagene Ansatz zur flachheitsbasierten Folgeregelung wurde außerdem auf ein schwach nichtlineares Rohrreaktormodell angewendet [4,5].

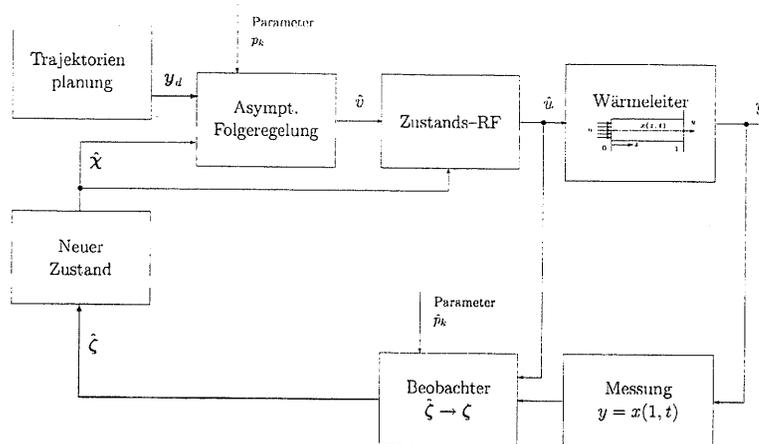


Abbildung 2: Blockschaltbild der flachheitsbasierten Regelung des linearen Wärmeleiters mit Vorsteuerung und Beobachter.

## Literatur:

- [1] Fliess, M., Lévine, P., Martin, P., Rouchon, P.: *Flatness and defect of nonlinear systems: Introductory theory and examples*. Int.J.Control 61, 1327–1361, 1995.
- [2] Laroche, B., Martin, P., Rouchon, P.: *Motion planning for the heat equation*. Int. J. Robust Nonlinear Control, 10, 629-643, 2000.
- [3] Lynch, A.F., Rudolph, J.: *Flachheitsbasierte Randsteuerung parabolischer Systeme mit verteilten Parametern*. Automatisierungstechnik 48(10), 478–486, 2000.
- [4] Meurer, T., Zeitz, M.: *Flachheitsbasierte Regelung von Systemen mit verteilten Parametern*. GMA-Workshop "Theoretische Verfahren der Regelungstechnik", Interlaken (CH), 22.-25.9.2002.
- [5] Meurer, T., Zeitz, M.: *A novel design approach to flatness--based feedback boundary control for nonlinear parabolic distributed parameter systems*. 2002 (To appear)
- [6] Rothfuss, R., Becker, U., Rudolph, J.: *Controlling a solenoid valve -- a distributed parameter approach*. Proc. "14th Int. Symp. of Mathematical Theory of Networks and Systems -- MTNS 2000", Perpignan, June 2000.
- [7] Rothfuss, R.: *Anwendung der flachheitsbasierten Analyse und Regelung nichtlinearer Mehrgrössensysteme*. Forts.-Ber. VDI Reihe 8 Nr. 664, VDI Verlag, Düsseldorf, 1997.
- [8] Lynch, A.F., Rudolph, J.: *Flatness-based boundary control of a nonlinear parabolic equation modelling a tubular reactor*. Nonlinear Control in the Year 2000 (volume 2), editors: A. Isidori, F. Lamnabhi-Lagarrique, and W. Respondek, Lecture Notes in Control and Information Science, Springer-Verlag, 45--54, 2000.

# Schätzung von Einzugsgebieten polynominaler nicht-linearer dynamischer Systeme als semidefinite Optimierungsaufgabe

Ossama Hachicho \*

Bernd Tibken \*\*

\* Automatisierungstechnik/Regelungstechnik  
Universität Wuppertal  
Fuhlrottstr. 10, 42097 Wuppertal  
Tel. 0202-439 2950  
Fax 0202-439 2953  
hachicho@uni-wuppertal.de

\*\* Automatisierungstechnik/Regelungstechnik  
Universität Wuppertal  
Fuhlrottstr. 10, 42097 Wuppertal  
Tel. 0202-439 2952  
Fax 0202-439 2953  
tibken@uni-wuppertal.de

**Schlüsselwörter:** Stabilität, Einzugsgebiete, semidefinite Optimierung, Theorie der Momente Ljapunow-Funktionen höheren Grades

Viele Prozesse in Natur und Technik lassen sich mit Hilfe polynominaler autonomer Differentialgleichungssysteme beschreiben. Mittels der Ljapunovschen Stabilitätstheorie können Ruhelagen solcher Systeme auf Stabilität untersucht werden. Dabei lässt sich das gesamte Einzugsgebiet (EG) einer asymptotisch stabilen Ruhelage in der Regel nicht in Form einer geschlossenen Lösung bestimmen. Daher ist eine „gute“ Schätzung, die gänzlich im EG liegt, unumgänglich. Eine Art „erste Näherung“ kann mit Hilfe geeigneter positiv definiter quadratischer Ljapunow-Funktionen (LF)  $V(x)$  erzielt werden. Dabei sucht man das größte Ellipsoid  $\Omega_c$ , das durch die Niveau-Hyperflächen der gegebenen quadratischen LF definiert ist, und gänzlich im Bereich der negativen Definitheit ihrer zeitlichen Ableitung liegt (Abb. 1) [1],[2],[4].

Die „Qualität“ der mit Hilfe quadratischer LF erzielten Schätzung ist durch ihre ellipsoidale Form erheblich beschränkt. Außerdem ist die Bestimmung einer im Sinne der Schätzung optimalen LF, besonders für Systeme höherer Ordnung, nur in wenigen Fällen möglich [3].

Um die Schätzung zu verbessern, müssen LF höheren Grades herangezogen werden. Der Nachteil der mit dem Zubov-Algorithmus [4] konstruierten LF liegt darin, dass die entsprechenden Schätzungen nicht monoton mit dem Grad der LF wachsen.

In diesem Beitrag diskutieren wir ein auf der Theorie der Momente [5] und in [6] bewiesenen Theoremen

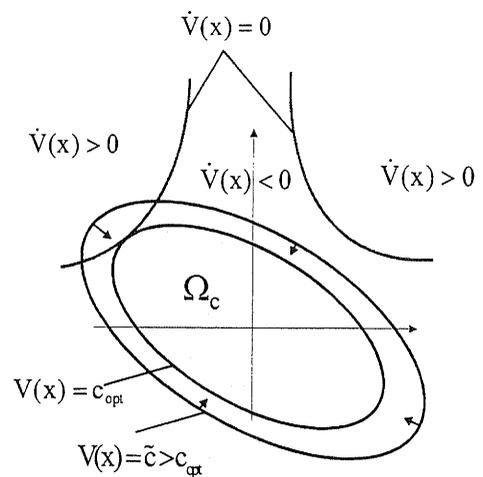


Abbildung 1: Schätzung des Einzugsgebietes mit quadratischen LF.

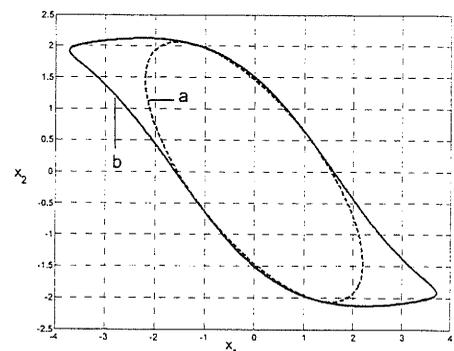


Abbildung 2: Gebiet a: Schätzung des EG mit quadratischer LF, Gebiet b: Schätzung des EG mit LF sechsten Grades.

basierendes Verfahren, mit dem LF höheren Grades als Lösung eines Semidefiniten Problems konstruiert werden können. Im Gegensatz zum Zubov-Algorithmus weisen die mit Hilfe dieser LF erzielten Schätzungen monotonen Wachsen auf. In Abb. 2 sind die Schätzung mit Hilfe einer quadratischen LF  $V_2(x)$  (Gebiet a) und die Schätzung mit Hilfe einer mit unserem Verfahren konstruierten LF sechsten Grades  $V_6(x)$  (Gebiet b) für folgendes System dargestellt

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= -x_1 + 2x_1^2x_2 \\ \dot{x}_2 &= -x_2,\end{aligned}$$

wobei

$$V_2(x) = 0,33 x_1^2 + 0,498 x_1x_2 + 0,376 x_2^2$$

und

$$\begin{aligned}V_6(x) &= 0,31113753x_1^2 + 0,03716988x_1^3x_2 + 0,469534818x_1x_2 + \\ &+ 0,00111012x_1^4x_2^2 + 0,028046364x_1^2x_2^2 + 0,354508216x_2^2.\end{aligned}$$

### Literatur:

- [1] B. Tibken, "Estimation of the domain of attraction for polynomial systems via LMI's", *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, December 12-15, 2000, Sydney, Australia., pp. 1853-1857.
- [2] O. Hachicho, B. Tibken, "Estimating domains of attraction of a class of nonlinear dynamical systems with LMI methods based on the theory of moments", to appear in the *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control*, December 10-13, 2002, Las Vegas, USA.
- [3] E. J. Davison and E. M. Kurak, "A computational method for determining quadratic Lyapunov functions for non-linear systems", *Automatica*, Vol. 7, 1971, pp. 627--636.
- [4] W. Hahn, *Stability of motion, Die Grundlehren der mathematischen Wissenschaften*, Band 138, Springer Verlag, 1967.
- [5] J.B. Lasserre, "Global optimization with polynomials and the problem of moments", *SIAM J. OPTIM.*, Vol. 11, 2000, pp. 796-817.
- [6] H. D. Chiang, J. S. Thorp, "Stability regions of nonlinear dynamical systems: a constructive methodology", *IEEE Trans. Automat. Control*, No. 12, 1989, pp. 1229-1241.

# Abstraktionsbasierte Analyse gesteuerter hybrider Systeme

Olaf Stursberg

Lehrstuhl Anlagensteuerungstechnik

Universität Dortmund

44221 Dortmund

Tel.: 0231-755-5342

Fax: 0231-755-5129

Email: olaf.stursberg@uni-dortmund.de

**Schlüsselwörter:** Abstraktion, Hybride Dynamische Systeme, Ereignisdiskrete Steuerungen, Algorithmische Verifikation.

Dieser Vortrag behandelt Methoden zum Entwurf von ereignisdiskreten Steuerungen für hybrid modellierte Systeme, also solchen Steuerungen die als Reaktion auf diskrete Ereignisse im hybriden System (meist bei Überschreiten von Grenzwerten) geeignete wertediskrete Stellgrößen erzeugen. Im Vordergrund des Vortrags steht die Methodik der algorithmischen Verifikation, bei der die Erfüllung einer gegebenen Verhaltensspezifikation für das gesteuerte hybride System überprüft wird, wie etwa das Nichterreichen sicherheitskritischer Zustände. Dazu wird ausgehend von einer Menge von Initialzuständen die erreichbare Zustandsmenge des hybriden Modells berechnet und für diese Menge die Einhaltung der Spezifikation beurteilt. Die auch als *Model Checking* bezeichnete Prozedur liefert im Falle der Nichteinhaltung eine die Spezifikation verletzende Systemtrajektorie, das sogenannte *Gegenbeispiel*.

Die bekannten Verfahren zum Model Checking von hybriden Automaten mit nichtlinearer kontinuierlicher Dynamik, welche sich im Wesentlichen durch die Art der Berechnung der Erreichbarkeitsmengen unterscheiden, besitzen einen gemeinsamen Nachteil [1]: Die Komplexität der Berechnung beschränkt die Anwendung auf relativ kleine Systeme, d.h. auf solche mit wenigen diskreten Zuständen im Transitionssystem und niedrig-dimensionalen kontinuierlichen Zustandsräumen. Der Vortrag stellt einen neuen Ansatz vor, der insbesondere die Komplexität bezüglich der Größe des Transitionssystems erheblich reduzieren kann. Die Motivation ist ein in [2] für Systeme mit ausschließlich diskreter Dynamik beschriebenes Prinzip, in der durch die Verwendung abstrakter und schrittweise verfeinerter Modelle der Analyseaufwand für verschiedene Beispiele um mehrere Größenordnung reduziert werden konnte.

Dieses Prinzip wird in der hier vorgestellten Arbeit auf hybride Modelle übertragen [3]: Zunächst wird der hybride Automat durch Abstraktion in ein diskretes Modell geringer Größe überführt, und für letzteres werden durch Suchalgorithmen jene Verhalten bestimmt, in denen die Nichteinhaltung der Spezifikation potentiell auftreten kann ist. Nur für die korrespondierenden Ausschnitte des hybriden Automaten wird nachfolgend die hybride Dynamik evaluiert, d.h. es wird überprüft, ob ein entsprechendes Gegenbeispiel existiert. Für diesen Validierungsschritt wurde eine Hierarchie von Methoden entwickelt, die darauf abzielen mit möglichst geringem Rechenaufwand die Existenz eines Gegenbeispiels zu widerlegen. Gelingt letzteres, so wird das abstrakte Modell anhand der durch die Validierung gewonnenen Information verfeinert – dagegen liegt bei Existenz eines Gegenbeispiels eine Nichteinhaltung der Spezifikation vor.

Der Vortrag beschreibt eine Prozedur bei der durch die iterative Anwendung von Abstraktion, Validierung und Modellverfeinerung die Korrektheit der Steuerung (im Sinne der Spezifikation) vollständig algorithmisch nachgewiesen werden kann. Im günstigsten Fall kann die Korrektheit der Steuerung völlig ohne die aufwendige Untersuchung der kontinuierlichen Dynamik bewiesen werden; im Regelfall ist der Anteil der zu untersuchenden hybriden Dy-

namik deutlich geringer als bei herkömmlichen Methoden. Diese Zusammenhänge werden anhand eines technischen Beispiels illustriert.

### **Literatur:**

- [1] I.B. Silva, O. Stursberg, B.H. Krogh, S. Engell: An Assessment of the current status of Algorithmic Approaches to the Verification of Hybrid Systems. Proc. 40<sup>th</sup> IEEE Conf. on Decision and Control, 2001, S. 2867-2874.
  - [2] E. Clarke, O. Grumberg, S. Jha, Y. Lu, H. Veith: Counterexample-Guided Abstraction Refinement. Proc. 12<sup>th</sup> Conf. on Computer-Aided Verification, Springer, LNCS 1855, 2000, S. 154-169.
  - [3] E. Clarke, A. Fehnker, Z. Han, B.H. Krogh, O. Stursberg, M. Theobald: Verification of Hybrid Systems based on Counterexample-Guided Abstraction Refinement. Eingereicht für: 9<sup>th</sup> Int. Conf. on Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems, Warschau, April 2003.
- .

# Fehlerdiagnose auf der Grundlage zeitbewerteter Automaten

Peerasan Supavatanakul \*

\* Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik

(Prof. Dr.-Ing. Jan Lunze)

Ruhr-Universität Bochum

Universitätsstraße 150, 44780 Bochum

Tel.: +49/234/32 25203

Fax : +49/234/32 14101

Email: supavatanakul@esr.ruhr-uni-bochum.de

**Schlüsselwörter:** Qualitativ Diagnose, ereignisdiskrete Systeme, zeitbewertete Automaten

Thema des Vortrages ist die Prozessdiagnose auf der Grundlage einer ereignisdiskreten Systembeschreibung. Dieses Diagnoseverfahren zielt auf die Erkennung von Fehlern ab, die zu einer qualitativen Änderung des Prozessverhaltens führen. Die Struktur des betrachteten Diagnosesystems ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Lösung der Diagnoseaufgabe erfolgt modellgestützt, wobei Modelle jeweils für das Nominalverhalten und für ausgewählte Fehlerfälle aufgestellt werden. Es wird untersucht, inwieweit die gemessene Ereignisfolge am Prozessausgang  $E(0...t_h)$  und die Eingangsfolge  $V(0...t_h)$  zu den einzelnen Modellen konsistent ist. Passt die gemessene Ereignisfolge nicht zum Modell des fehlerfreien Systems mit der gegebenen Eingangsfolge  $V(0...t_h)$ , so ist mit Sicherheit ein Fehler eingetreten. Bei guter Übereinstimmung mit dem Verhalten des für den Fehler  $f_i$  aufgestellten Modells ist mit hoher Wahrscheinlichkeit der Fehler  $f_i$  aufgetreten.

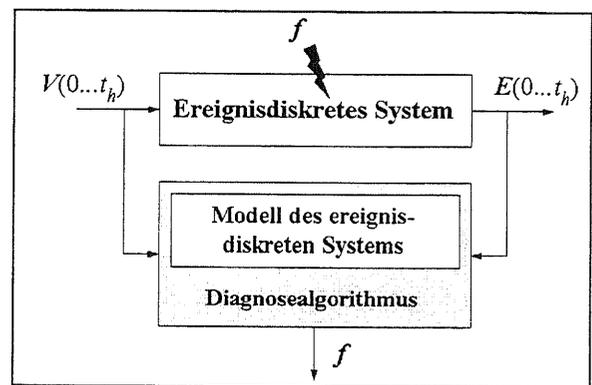


Abbildung 1: Prozessdiagnose

Das Diagnosekonzept ist realisierbar, wenn das ereignisdiskrete Eingangs-Ausgangsverhalten des betrachteten Prozesses z.B. durch ein vorhandenes detailliertes dynamisches Modell bekannt ist. Allerdings kann in vielen Fällen der Fehler nicht allein aus der vom System erzeugten Ereignisfolge erkannt werden [2]. Wird jedoch zusätzlich die zeitlichen Abfolge der Ereignisse berücksichtigt, so lässt sich eine wesentlich Verbesserung der Diagnose erzielen. In diesem Fall ist eine Modellierung des Nominalfalls und der Fehlerfälle durch zeitbewertete ereignisdiskrete Systeme erforderlich.

Dieser Beitrag stellt eine Lösung des Diagnoseproblems mittels zeitbewerteter Automaten vor. Der zeitbewertete Automat stellt eine Erweiterung des nichtdeterministischen Automaten dar, wobei für jeden Zustandsübergang ein Zeitfenster vorgegeben wird, in dem dieser Zustandsübergang auftreten kann [1]. Für die Darstellung eines ereignisdiskreten Systems durch einen solchen Automaten wird die Eingangsfolge des Systems als Eingangsgröße für Automaten verwendet. Die Zustandsfolge des Automaten repräsentiert die im System auftretende Ereignisfolge.

Der zeitbewertete Automat kann mit unterschiedlichen Methoden gewonnen werden, z.B. durch Abstraktion [4] oder durch Identifikation von Messwertfolgen. Für den Spezialfall eines synchronisierten und geregelt Prozesses kann der Automat durch Transformation von Synchronisationsgraphen gewonnen werden [6].

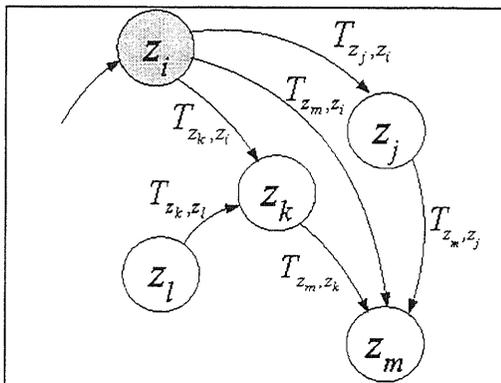


Abbildung 2: Ein Automatengraph

Abbildung 2 zeigt den Automatengraph für einen Teil eines zeitbewerteten Automaten. Die Automatenzustände sind durch  $z_i$  gekennzeichnet. Das Zeitfenster für Übergang vom Zustand  $i$  nach  $j$  wird durch  $T_{z_j, z_i}$  dargestellt. Es ist offensichtlich, dass der Automat nichtdeterministisch ist. Dies ist eine wichtige Eigenschaft bezüglich der Prozessüberwachung mit qualitativen Messgrößen [3].

Der Diagnosealgorithmus überprüft zu jedem Zeitpunkt die Konsistenz der gemessenen Ereignisse mit den des zeitbewerteten Automaten unter Berücksichtigung der betrachteten Fehlerfälle [5]. Modellbasierte Diagnoseverfahren können unabhängig vom Prozess und von den verwendeten Prozessmodellen implementiert werden. Dadurch ergibt sich bei einer technischen Anwendung die Möglichkeit, dass bei einer Änderung des Prozesses, z.B. durch Umbaumaßnahmen, lediglich das Modell ersetzt werden muss.

Der Vortrag gibt eine Einführung die Theorie der zeitbewerteten Automaten und deren Anwendung in der Fehlerdiagnose. Die technische Relevanz des Verfahrens wird am Beispiel der Fehlerdiagnose industrieller Aktoren gezeigt.

## Literatur:

- [1] Alur, R.; Dill, D.L.: A theory of timed automata, Theoretical Computer Science, 126 (1994), 183-235.
- [2] Lunze, J.: Ein Diagnoseverfahren für kontinuierliche Systeme mit quantisierten Meßgrößen, Automatisierungstechnik, 48 (2000), 351-359.
- [3] Lunze, J.: Diagnosis of quantized systems based on a timed discrete-event model, IEEE Transaction SMC Part A, 30 (2000), 860-865.
- [4] Lunze, J.; Supavatanakul, P.: Diagnosis of discrete event systems described by timed automata, 15th IFAC World Congress, Barcelona, 2002.
- [5] Lunze, J.; Supavatanakul, P.: Timed discrete-event method for diagnosis of industrial actuators, IEEE International Conference on Industrial Technology, Bangkok, 2002.
- [6] Schullerus, G.; Supavatanakul P.; Krebs, V.; Lunze, J.: Relation of timed event graphs and timed automata in fault diagnosis, submitted to SAFEPROCESS 2003.

# Adaptive Führung eines Gleitlagerprüfstands

R. Bauer

Institut für Regelungstechnik  
Technische Universität Graz  
Inffeldgasse 16c, A-8010 Graz  
Tel.: +43/316/873-7036  
Fax: +43/316/873-7028  
Email: bauer@irt.tu-graz.ac.at

**Schlüsselwörter:** Periodisch zyklische Prozesse, nichtparametrische Identifikation

Gleitlager kommen überall dort zum Einsatz, wo die auftretenden Lagerkräfte für andere Lagerbauformen (wie Rollen- oder Walzenlager) zu groß sind. Ein Beispiel sind Hubkolbenmotoren, in denen die Längsbewegung des Kolbens in eine Rotationsbewegung der Kurbelwelle umgewandelt wird. Insbesondere zum Verbrennungszeitpunkt müssen die Lager enormen Kräften standhalten. Ein Industrieunternehmen im oberösterreichischen Raum entwickelt und produziert hochbelastbare Gleitlager für Diesel- und Gasmotoren. Um die Qualität der Lager objektiv beurteilen zu können, ist eine Prüfung unter reproduzierbaren Bedingungen mit *frei wählbaren* Lagerkraftverläufen  $r(t)$  notwendig. Für diesen Zweck wurde von einer Grazer Firma der in Abbildung 1 schematisch dargestellte hydraulische Gleitlagerprüfstand entwickelt.

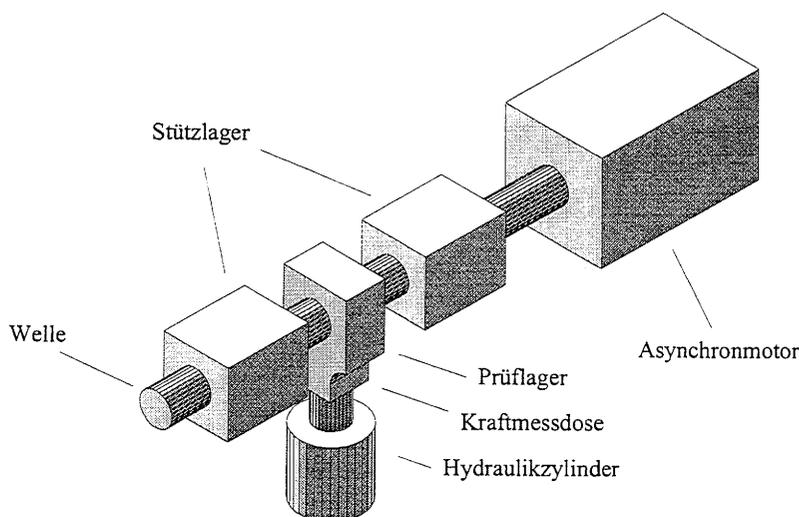


Abbildung 1: Gleitlagerprüfstand

Ein typischer vorgegebener periodischer Lagerkraftverlauf (mit  $\omega=2\pi 100$  [rad/s])

$$r(t) = 23.61 + 19.86 \cos(\omega t - 1.92) + 10.61 \cos(2\omega t + 2.94) + 2.19 \cos(3\omega t - 0.01)$$

konnte mit einem klassischen Regelungskonzept aber nur unbefriedigend nachgefahren werden. Abbildung 2 zeigt den gewünschten Kraftverlauf  $r(t)$  und die tatsächliche Kraft  $y(t)$ , mit der das Lager belastet wurde.

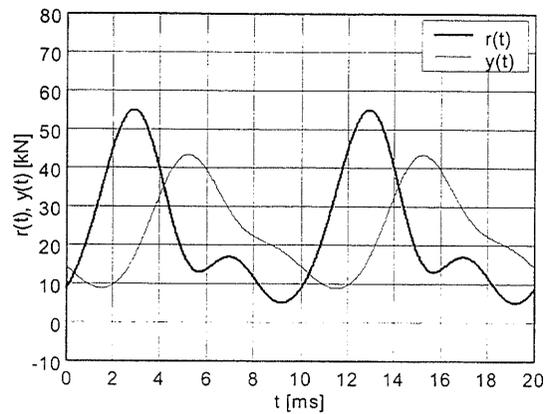


Abbildung 2: Gewünschter und tatsächlicher Kraftverlauf (ohne adaptive Führung)

Die Strecke kann näherungsweise als lineares Übertragungssystem mit BIBO-Eigenschaft aufgefasst werden. Das Übertragungsverhalten hängt dabei von sehr vielen Faktoren ab (Gleitlager, Gleitlageröl, Drehzahl, Lagerkraftverlauf, etc.), die sich auch im Betrieb langsam ändern können. Die Idee für eine mögliche Lösung ist folgende: Mit Hilfe des Frequenzgangs der Strecke wird durch einfache Überlegungen ein Eingangssignal generiert, das am Streckenausgang den gewünschten Kraftverlauf liefert.

Man benötigt dafür - im Gegensatz zu anderen Ansätzen - lediglich die Werte des Frequenzgangs bei ganzzahligen Vielfachen der Grundfrequenz der periodischen Führungskurve. Im Betrieb kann man genau diese Werte sehr leicht durch eine nichtparametrische Identifikation bestimmen. Mit Hilfe dieser Frequenzgangswerte kann das Streckeneingangssignal laufend so verändert werden, dass sich die Streckenausgangskurve der Führungskurve annähert. Um diese prinzipiell einfache Idee auch in die Praxis umzusetzen, muss noch eine Reihe von Problemen gelöst werden. So müssen etwa die Spektralanteile eines kontinuierlichen Signals mit Hilfe von zeitdiskret abgetasteten Werten bestimmt werden. Es muss geklärt werden, wie bei Führungskurven mit (zumindest theoretisch) unendlich vielen Oberwellen vorgegangen werden soll. Weiters muss die Berechnungsvorschrift für die Ermittlung des neuen Streckeneingangssignals auch ein günstiges Anlaufverhalten aufweisen.

Zusammenfassend liefert diese Methode im vorliegenden Fall *ohne* analytische Modellbildung nach kurzer Zeit eine Ausgangskurve, die mit der Führungskurve praktisch identisch ist. Der nach diesem Prinzip arbeitende Gleitlagerprüfstand bewährt sich bereits seit längerer Zeit im praktischen Einsatz.

### Literatur:

- [1] Leonhard W.: Digitale Signalverarbeitung in der Meß- und Regelungstechnik, Teubner, 1989
- [2] Oppenheim A., Schafer R.: Discrete-Time Signal Processing, Prentice Hall, 1999
- [3] Wagner B.: Iterativ lernende Regelungen für periodisch zyklische Prozesse, Automatisierungstechnik 47 (1999), S.89-93

# Regelung beim Antrieb und Wickeln von elastischen Stoffbahnen

D. Knittel, Y. Xu, M. de Mathelin, E. Ostertag

Université Louis Pasteur Strasbourg,  
ERT Enroulement, LSIIT/AVR,  
Boulevard Sébastien Brant, 67400 Illkirch, France  
<http://ert-enroulement.u-strasbg.fr>, <http://lsiit.u-strasbg.fr>  
fax : +33 3 90 24 44 80  
[dominique.knittel@ipst-ulp.u-strasbg.fr](mailto:dominique.knittel@ipst-ulp.u-strasbg.fr)

**Schlüsselwörter :** Transport und Wickeln viskoelastischer Stoffbahnen,  $H_\infty$  und LPV Regelung, dezentrale Regelung, LMI Optimierung, adaptive Ausregelung quasi-periodischer Störungen

Bei der Herstellung oder Verarbeitung von Papier, Kunststoff, Textilien oder Metall werden kontinuierliche Fertigungsanlagen eingesetzt. Charakteristisch ist eine durchlaufende Stoffbahn, die sämtliche Antriebe der Anlage miteinander verkoppelt. Der Leittrieb mit überlagertem Drehzahlregler gibt der Stoffbahn die gewünschte Geschwindigkeit. Die Folgantrieben dienen dem Transport und dem Erzeugen der gewünschten Stoffspannung. Um einen einwandfreien Transport und Wickeln zu erreichen, müssen die Bahnkräfte innerhalb enger Grenzen geregelt werden.

Der Vortrag wird einen aktuellen Einblick in die robusten Mehrgrößenregelungen für Ab/Aufwickel- und Transportsysteme viskoelastischer Stoffbahnen geben. Zuerst werden die an einer, aus 3 Synchronmotoren bestehende Anlage, erprobten  $H_\infty$  und LPV Gesamtregler mit dezentrale PI Regelungen verglichen. Für eine industrielle Anlage, bestehend aus mehreren Antrieben, ist es aber nicht möglich eine globale (zentrale) Regelung einzusetzen. Aus diesem Grund ist das Gesamtsystem in Einzelsysteme zerlegt, die sich aber teilweise überdecken können (Overlapping control) [3], und dezentrale Mehrgrößenregler sind entworfen. Die Ergebnisse der Regler an einem 9-Motoren Simulator (in Matlab/Simulink Umgebung) zeigen, dass die Bahnkräfte bei Geschwindigkeitsänderungen innerhalb enger Grenzen liegen.

Der letzte Teil des Vortrags liegt im Bereich der robusten adaptiven Ausregelung von quasi-periodischen Störungen : es sollen deformierte Rollen mit konstanter Stoffspannung abgerollt werden [4].

## Literatur

- [1] H. Koç. Modélisation et commande robuste d'un système d'entraînement de bande flexible, Doctoral Thesis, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 2000.
- [2] Koç, H., D. Knittel, M. de Mathelin, G. Abba. Modeling and robust control of winding systems for elastic webs, IEEE Transactions on Control Systems Technology, march 2002, vol. 10, n°2, p. 197-208.
- [3] Knittel D., D. Gigan, E. Laroche, Robust decentralized overlapping control of large scale winding systems, American Control Conference (ACC), Anchorage 2002
- [4] Y. Xu, M. de Mathelin, D. Knittel, Adaptive rejection of eccentricity tension disturbances in web transport systems, IFAC World Congress, Barcelona, 2002
- [5] K. H. Shin. Distributed control of the tension in multi-span web transport systems. PhD Thesis, Oklahoma State University (Oklahoma), may 1991.
- [6] J. G. VanAntwerp. Globally optimal robust control for large scale sheet and film processes. PhD Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1999.
- [7] Wolfermann, W., Tension control of webs - a review of the problems and solutions in the present and future, Proceed. IWEB3, Oklahoma, 1995, pp. 198-229
- [8] Knittel D., E. Laroche, D. Gigan. Tension control for winding systems with two degrees of freedom  $H_\infty$  controller, IEEE Transactions on Industry Applications (IAS), to appear.
- [9] Bodson M., S. C. Douglas, Adaptive algorithms for the rejection of sinusoidal disturbances with unknown frequency, Automatica, vol. 33, no. 12, pp. 2213-2221, 1997.

# DIO als Basis für komponentenbasierte Automatisierungssoftware

Dipl.-Ing. V. Hänsel \*

\* vormalig Professur für Prozessleittechnik  
jetzt: Automatisierungstechnik Voigt GmbH  
D-01187 Dresden, Löbtauer Str. 67  
Tel.: (0351) 47960588  
Fax: (0351) 4700085  
[Volker.Haensel@ATVoigt.de](mailto:Volker.Haensel@ATVoigt.de)

Prof. Dr.-Ing. habil. P. Rieger \*\*

\*\* Professur für Prozessleittechnik  
Technische Universität Dresden  
D-01062 Dresden, Mommsenstraße 13  
Tel.: (0351) 463 33439.  
Fax: (0351) 463 37039  
[rieger@eatns1.et.tu-dresden.de](mailto:rieger@eatns1.et.tu-dresden.de)

**Schlüsselwörter:** Softwarekomponenten, verteilte Automatisierungssysteme

Automatisierungsanlagen der heutigen Generation sind durch einen hohen Anteil dezentraler Verarbeitungseinheiten gekennzeichnet. Diese Anlagenmodule sind eigenständige Verarbeitungsknoten mit einer teilweise hohen Rechenleistung. Die nötigen Kommunikationsbeziehungen der Knoten werden über Bussysteme wie beispielsweise TCP/IP oder Profibus realisiert.

Aus dieser Komponentensichtweise der Hardwarekomponenten ergibt sich zwangsläufig auch eine komponentenbasierte Automatisierungssoftware. Dabei spiegelt jede Softwarekomponente eine reale Hardwarekomponente oder auch nur einen Teil dieser wider. Eine solche objektorientierte Sichtweise ist bereits ein gängiges Entwicklungswerkzeug zur Softwarebeschreibung. Ein aktueller Ansatz ist die physische Verteilung der Komponenten über das gesamte Netz der Automatisierungsanlage. Die Softwarekomponenten belegen an denjenigen Stellen Rechenleistung, an denen sie am effektivsten ihre Verarbeitung durchführen können – die Verarbeitungsintelligenz wird dadurch über die gesamte Anlage verteilt. Beispielsweise kann die Messwertvorverarbeitung in einer Komponente direkt im Sensor geschehen oder eine Positionsregelung im Aktor selbst erfolgen. Die reine Komponentenverteilung bringt zwangsläufig noch keine Vorteile. Ein realer Vorteil entsteht erst durch die Definition von einheitlichen Schnittstellen und Funktionsprinzipien.

An der TU Dresden wurde in [1] das komponentenbasierte Softwaremodell DIO (Distributed Intelligent Object) definiert. Im vorliegenden Beitrag wird nun die Weiterentwicklung dieses Modells vorgestellt. DIO ist der Rahmen – das Framework für eine komponentenbasierte Automatisierungssoftware. Das Komponentenmodell gliedert eine Anwendung in Komponenten, die eine Kommunikationsbeziehung untereinander aufbauen können. Die Schnittstellen zwischen den DIO-Komponenten sind typisierte Eingangs- und Ausgangsport. Die Datenübertragung zwischen den Komponenten wird stets über diese veröffentlichten Datenschnittstellen abgewickelt. Der eigentliche Transport der Daten bleibt aus Komponentensicht vollständig transparent und wird von der inhärenten Software des Frameworks übernommen. Das Framework unterscheidet selbstständig, ob die nötige Kommunikationsbeziehung lokal oder über ein angeschlossenes Bussystem durchgeführt werden soll. Die Bussystem-basierte Datenübertragung kann einerseits über das standardisierte Protokoll SOAP (Simple Object Access Protocol) oder über ein spezifisches und effektives Binärprotokoll abgewickelt werden. Die Nutzung von Übertragungsstandards ebnet den Weg für den Einsatz vieler unterschiedlicher Systeme innerhalb einer Anwendung und kann den Zusammenschluss mehrerer Systemwelten bedeuten. Abbildung 1 veranschaulicht die interne Arbeitsweise des Frameworks.

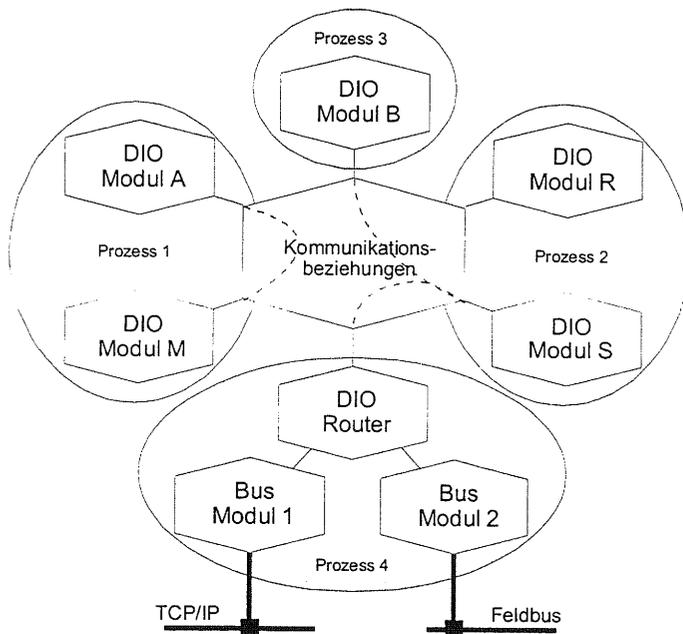


Abbildung 1: Zur DIO-Funktionalität

Die Verwendung von DIO-Komponenten bringt eine Vereinfachung für die Programmentwicklung mit sich. Der Applikationsentwickler übernimmt lediglich die „Verschaltung“ der Komponenten ohne Compiler oder Linker. Mit einer möglichen grafischen Konfigurierunterstützung wird die Anwendungserstellung und -wartung auch einem solchen Personenkreis zugänglich, der sich nicht mit Programmierdetails auskennen muß. Die Applikation läuft nach der Aktivierung der Kommunikationsverbindungen dezentral ohne eine übergeordnete überwachende Steuerung ab. Die Definition der Kommunikationsbeziehungen und der Komponentenverteilung wird damit ein Teil der Buskonfigurierung. Entwickler von Komponenten müssen sich nicht mehr in spezielle Bussysteme einzuarbeiten, falls das konkrete Bussystem bereits im Framework berücksichtigt ist. Durch Definition der Ein- und Ausgangsports ist die Schnittstelle zu allen weiteren Komponenten und dadurch ein hoher Grad an Wiederverwendbarkeit und Übertragbarkeit auf andere Plattformen sichergestellt.

Durch die Komponentenverteilung verteilt sich auch das notwendige Rechen- und Kommunikationsaufkommen auf eine größere Anzahl von Teilsystemen, möglicherweise geht das mit einer Einsparung größerer Verarbeitungseinheiten einher. Die Verteilung der Komponenten bedingt zugleich auch Behandlungsstrategien für z.B. das Anfahren und Abfahren von Applikation, das Eingliedern und Ausgliedern von Komponenten während des laufenden Betriebes, das automatische und zugleich stoßfreie Einfügen bei zeitweiligen Ausfällen und weiteres.

### Literatur:

- [1] Hoang, M.S.: Ein komponentenbasiertes Softwaremodell für verteilte Automatisierungssysteme. Dissertation TU Dresden, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, 1998.
- [2] Hoang, M.S.; Rieger, P.: Komponentenbasierte Automatisierungssoftware. Hanser Verlag 1999.
- [3] Hänsel, V.: SOAP in komponentenbasierten Objekttechnologien. Diplomarbeit TU Dresden, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, 2001.

# Dynamische Online Diagnose

A. Münnemann \*

U. Epple \*\*

\* Lehrstuhl für Prozessleittechnik

RWTH Aachen

52056 Aachen

Tel.: 0241/8095161

Fax: 0241/8092238

Email: [ansgar@plt.rwth-aachen.de](mailto:ansgar@plt.rwth-aachen.de)

\*\* Lehrstuhl für Prozessleittechnik

RWTH Aachen

52056 Aachen

Tel.: 0241/8097737

Fax: 0241/8092238

Email: [epple@plt.rwth-aachen.de](mailto:epple@plt.rwth-aachen.de)

**Schlüsselwörter:** Online Diagnose, dynamische Strukturänderungen, Detektion von Oszillationen

Diagnoseanwendungen werden klassischerweise auf drei alternative Arten durchgeführt. Bei der *offline Archivdatenanalyse* werden die Prozessdaten vom Leitsystem erfasst und in Archiven abgelegt. Auf diesen Daten können dann verschiedene, komplexe Analyseverfahren zur Signaldiagnose durchgeführt werden. Im Bereich der Feldgeräte, Kompaktregler und teilweise auch in komplexen Funktionsbausteinen findet man dagegen häufig die *festintegrierte Onlinediagnose*. Hier werden einfache Algorithmen parallel zur Messwerterfassung oder -verarbeitung durchgeführt, die eine Diagnoseaussage über das jeweilige Gerät ermöglichen. *Externe Online Diagnose Tools* greifen über eine „offene“ Kommunikationsschnittstelle auf die aktuellen Daten des Leitsystems zu und ermöglichen so einen mobilen Einsatz .

Der Grundgedanke der Dynamischen Online Diagnose ist es, verschiedene Diagnosefunktionen bedarfsorientiert in den prozessnahen Bereich des bestehenden Automatisierungssystems zu „laden“ (siehe Abbildung 1), um so umfangreiche Diagnosen mit kleinen Abstraten auch in Systemen mit begrenzten Ressourcen zu ermöglichen. Die Realisierung eines solchen Vorgangs kann auf unterschiedliche Weisen erfolgen. Im komfortabelsten Fall könnten die Diagnosefunktionsklassen im laufenden Betrieb in das Automatisierungssystem geladen und dort ausgeführt werden. Alternativ kann eine Realisierung auf einer fest im System vorhandene Diagnosefunktionsbibliothek erfolgen, die dann für den Einzelfall nur noch dynamisch instanziiert werden müssen. In diesem Beitrag wird die Detektion von Oszillationen (s.a. Hägglund [1]) auf der Grundlage eines dynamisch aus Standardfunktionsbausteinen aufgebauten Diagnosenetzwerkes betrachtet. Da bei der dynamischen Online Diagnose das zu diagnostizierende System wechselt, müssen die Parameter und Bewertungsgrenzen der Diagnose (Diagnosedauer, Schranke des Integralmaßes für Oszillation, etc.) für das aktuell betrachtete System identifiziert werden. Um die eigentliche Diagnosefunktion ausführen zu können müssen i.A. zuvor bestimmte Systemparameter über eine entsprechende Methodik bestimmt werden. Das Ergebnis dieser Vordiagnose fließt dann in die eigentliche Diagnose bzw. in evtl. weitere Vordiagnoseschritte mit ein. In jedem Diagnose und Vordiagnoseschritt müssen die zugehörigen Analysen und Umstrukturierungen des aktuell betrachteten (Teil-)Systems durchgeführt und nach der Funktionsausführung wieder rückgängig gemacht werden.

## Literatur:

[1] Hägglund, T. (1995). *A control-loop performance monitor*. Control Eng. Practice, 3, 1543-1551

# Haptische Telepräsenz mit Totzeit

Sandra Hirche

Martin Buss

Fachgebiet Regelungssysteme, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik  
Technische Universität Berlin,  
Einsteinufer 17, 10587 Berlin

Tel.: 030 314 22999, Fax: 030 314 21137, hirche@rs.tu-berlin.de, m.buss@ieee.org

**Schlüsselwörter:** Telepräsenz, bilaterale Teleoperation, haptische Teleaktion, (variable) Kommunikationslatenzen, *Quality-of-Service*

Durch die weite Verbreitung von Kommunikationsinfrastrukturen wie des Internets gewinnt wirklichkeitsnahe Telepräsenz und Teleaktion (Telemanipulation) eine immer größer werdende Bedeutung. Durch multimodale Telepräsenztechniken – insbesondere die Erweiterung von Multimedia durch die haptische Modalität (Rückkopplung von Kräften und Berührungseindrücken) – können Aktionen in weit entfernten, gefährlichen, nicht zugänglichen, skalierten, unbequemen, virtuellen oder augmentierten Umgebungen ohne wesentliche Einschränkung des Präsenzgefühls wirklichkeitsnah ausgeführt werden [1]. Die Vielzahl möglicher Anwendungen umfasst z.B. Tele-Medizin, Tele-Diagnose, Tele-Service, Tele-Manufacturing, Tele-Shopping, Tele-Tourismus usw.

Durch bekannte regelungstechnische, passivitätsbasierte Ansätze kann für *konstante* Totzeiten (Kommunikationslatenzen) Stabilität in einem haptischen Teleaktions-System garantiert werden [1-3]. *Variable* Totzeiten, wie sie im Internet auftreten, verursachen zusätzliche, bisher nicht abschließend gelöste Probleme.

Dieser Vortrag führt in die bekannten regelungstechnischen Verfahren zur haptischen Teleaktion ein und stellt neue regelungstechnische Konzepte zur Erhöhung der Transparenz durch optimale Impedanz-Anpassung vor. Experimentelle Resultate mit dem in Abb.1 dargestellten System zeigen, dass diese neuen Ansätze in Kommunikationsumgebungen mit *variabler* Totzeit hinsichtlich Stabilität und Transparenz vielversprechend sind. Gleichzeitig wird deutlich, dass die Eigenschaften des Kommunikationskanals entscheidenden Einfluss auf die Regelgüte haben. In einem Ausblick werden daher Möglichkeiten zur gezielten Veränderung der Kanaleigenschaften durch dynamische *Quality-of-Service*-Regelung aufgezeigt.

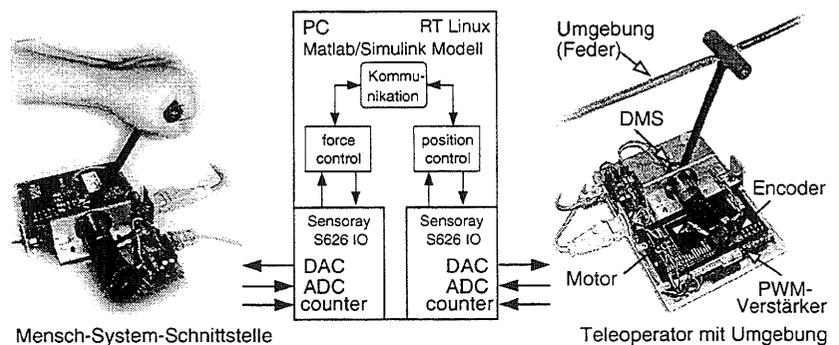


Abbildung 1: Telepräsenz-Experimentalsystem

## Literatur:

- [1] M. Buss and G. Schmidt, "Control Problems in Multi-Modal Telepresence Systems", in *Advances in Control: Highlights of the 5th European Control Conference ECC'99 in Karlsruhe, Germany* (P. Frank, ed.), pp. 65–101, Springer, 1999.
- [2] R. Anderson and M. Spong, "Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay", *IEEE Transaction on Automatic Control*, vol. 34, pp. 494–501, 1989.
- [3] H. Baier, M. Buss, and G. Schmidt, "Stabilität und Modusumschaltung von Regelkreisen in Teleaktionssystemen", *at-Automatisierungstechnik*, vol. 48, pp. 51–59, Februar 2000.

# Prüfstand für Entwicklung, Erprobung und Optimierung komplexer Energiespeichersysteme von Elektrofahrzeugen

T. Rethmann

G. Goch

Fachgebiet Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik  
Universität Bremen

Hochschulring 20, Postfach 33 05 60, 28335 Bremen

Tel.: +49/421/218 5627

Tel.: +49/421/218 5515

Fax: +49/421/218 5625

Fax: +49/421/218 5625

Email: rt@biba.uni-bremen.de

Email: gg@biba.uni-bremen.de

**Schlüsselwörter:** Elektrofahrzeuge, Energiespeicher, Prüfstand, Hardware-in-the-loop, EFRB<sup>1</sup>

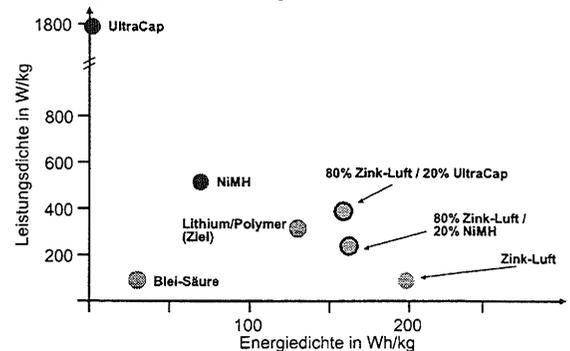
Ein Grund für die geringe Akzeptanz von Elektrofahrzeugen ist die bis heute offene Problematik der geringen Reichweite und in zweiter Linie des geringen Beschleunigungsvermögens. Konventionelle Batterien für Elektrofahrzeuge haben aktuell unzureichende Eigenschaften hinsichtlich der Kriterien Leistungsdichte (Leistung pro Masse) als Maß für das Beschleunigungsvermögen des Fahrzeugs und Energiedichte (Energie pro Masse) als Maß für die Reichweite. Die klassische Bleibatterie erzielt 75 W/kg und 28 Wh/kg und moderne Nickelmetallhydrid-Akkumulatoren (NiMH) weisen 500 W/kg und 70 Wh/kg auf, was in der Praxis zu einer Reichweite von ca. 100 km führt.

Die Optimierung der Batterien auf hohe Leistungsdichte ist dabei ein gegensätzliches Entwurfskriterium zur Verbesserung der Energiedichte. Daher konnten beide Kriterien bisher in einer einzelnen Batterie nicht ausreichend realisiert werden, um ein Fahrzeug zu entwickeln, das sowohl eine akzeptable Reichweite, als auch ein akzeptables Beschleunigungsvermögen für ein normales Fahrverhalten besitzt. Eine mögliche Lösung dieses Konfliktes liegt in der Kombination von verschiedenen Energiespeichern zu einem aktiven Speichersystem [1].

Die Vorteile bestehen darin, die Teilsysteme auf ihre jeweilige Aufgabe spezifisch auslegen zu können, was zu einer optimierten Systemperformance führt (siehe Bild 1).

Zur Anpassung der unterschiedlichen Spannungsniveaus erfolgt eine Verbindung der Komponenten über DC-DC-Wandler. Es ergibt sich daraus die Notwendigkeit der aktiven Steuerung in Abhängigkeit von der Fahrsituation durch ein Energiemanagement-System (EMS). Die Entwicklung dieses EMS ist u.a. ein zentraler Bestandteil des Projekts EFRB<sup>1</sup>. Ein Prüfstand zur Unterstützung der Entwicklung und zum Test der Speicher- und Leistungselektronik-Komponenten und des EMS wird aufgebaut.

Das **Anforderungsprofil an den Prüfstand** ergibt sich daraus, reale Komponenten in ihrem Zusammenwirken wirklichkeitsnah testen zu können, d.h. die elektrische Belastung der Antriebssysteme muß realen Fahrsituationen entsprechen, da das EMS aktiv auf diese reagiert. Die Nachbildung verschiedener realistischer Streckenprofile für unterschiedliche Fahrzeug-situationen ermöglicht einen optimierten Einsatz der Komponenten im Gesamtspeicher-



**Bild 1 Diagramm Leistungs- und Energiedichte verschiedener Energiespeichersysteme**

<sup>1</sup> Projekt EFRB: Mobile elektrische Energieversorgung für Fahrzeuge mit großer Reichweite und hoher Beschleunigung; gefördert seit 2000 durch das BMWi

system. Als kurzfristige Fahrsituation ergibt sich beispielsweise das Anfahren oder die Nutzbremsung, bei der ein Speicher mit hoher Leistungsdichte als Booster bzw. als elektrischer Speicher für die Bremsenergie genutzt wird. Langfristige Fahrsituationen wie Stadtfahrt, Bergfahrten, Schnellstraße und Lieferverkehr (Paketdienst) erfordern hingegen andere Strategien hinsichtlich des zu erwartenden Leistungsbedarfs. Durch Standardfahrzyklen läßt sich das Speichersystem mit anderen Fahrzeugen vergleichen. Eine modellbasierte Nachbildung des Fahrerverhaltens ermöglicht eine höhere Zuverlässigkeit einzelner „Testfahrten“ als das klassische manuelle Fahren auf einem Rollenprüfstand. Durch die Verwendung von realen Komponenten kann auch die Reaktionen auf Fehlerzustände getestet werden. Dies reduziert den Anteil der erforderlichen Testfahrten mit einem Fahrzeug bis zur Einsatzreife auf ein Minimum und garantiert gleichbleibende Testbedingungen.

Der **Kern des Prüfstandes** besteht aus den realen elektrischen Speichersystemkomponenten einschließlich dem Antriebsmotor des Elektrofahrzeugs. Das Fahrzeugverhalten und die Fahrstrecken lassen sich modellbasierend mit Hilfe einer „Lastmaschine“ an der Motorwelle nachbilden (vgl. Bild 2).

Die Steuerung des Prüfstandes erfolgt mit dem im KFZ-Bereich üblichen Feldbussystem CAN. Die Entwicklung der Prüfstandsteuerung und des EMS wird mit Matlab/Simulink auf dSpace-Hardware realisiert. Die Prüfstandkomponenten sind dabei an das Modell so über Hardwareschnittstellen gekoppelt, daß die Meßgrößen in Echtzeit verarbeitet und das Modellverhalten direkt auf die Lastmaschine rückgekoppelt wird (Hardware-in-the-Loop).

Da die verwendete Zink/Luft-Batterie nicht elektrisch wieder aufladbar ist, wird sie aus Kostengründen durch eine Gleichstromquelle simuliert.

Die **Parameteridentifikation** des am Prüfstand zu implementierenden Fahrzeugmodells erfolgt mit Hilfe von Herstellerinformationen oder Testfahrten, wobei die Notwendigkeit besteht, mit nur wenigen Testfahrten die Modellparameter anzupassen.

Als Systemparameter werden Masse, Rollreibung, Gang-abhängige Verluste, dynamischer Radradius, Motor-Wirkungsgrad (abhängig von der Temperatur) und  $c_w$ -Wert identifiziert.

Im Vortrag werden anhand von Meßdaten das Verhalten eines Speichersystems mit zwei Boosterkomponenten und mit simulierter Zink-Luft-Batterie in realen Fahrsituationen erläutert. Als Booster-Komponenten dienen ein UltraCap-Modul der Fa. EPCOS und ein NiMH-Akkumulator der Fa. Varta. Künftig können am Prüfstand durch Modifikation der Gleichstromquelle auch Power-Assist-Anwendungen mit Komponenten, wie Brennstoffzellen oder Hybridfahrzeuge untersucht werden.

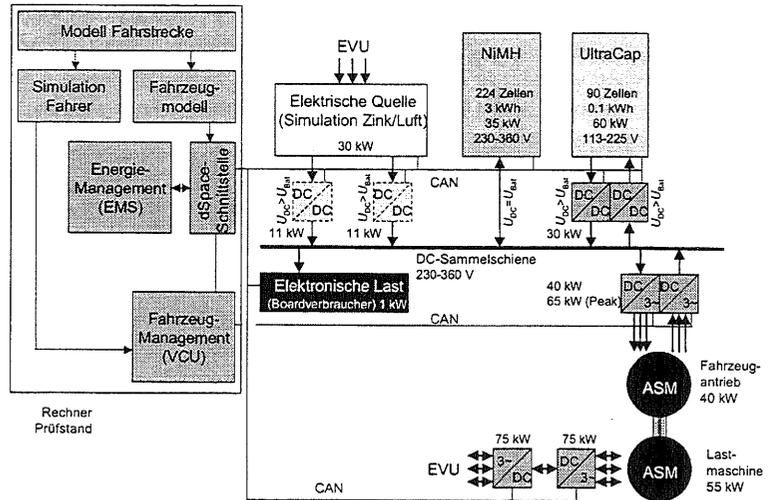


Bild 2 Aufbau des Prüfstandes

## Literatur:

- [1] Selzer, H.: Electric storage system for great mileage and high acceleration, Tagungsband 31th International Symposium on Automotive Technology & Automation, Dublin, Irland, ISATA 00ELE012, 2000
- [2] Buckentin, W.: Zink-Luft-Batterie-Einsatz in Bremen, DGES Tagungsband Elektrofahrzeuge Entwicklungserfolge und Perspektiven, Karlsruhe, 1999
- [3] Ament, C.: Doppelschichtkondensatoren in Kombination mit anderen Speichern für Traktionsanwendungen, Tagungsband 1. Anwenderforum Doppelschichtkondensatoren, S.85-90, Kassel, 1999

# Modellbasierte Überwachungsmethoden für einen Dieselmotor mit Abgasturbolader

Dipl.-Ing Anselm Schwarte \*  
Dipl.-Ing. Frank Kimmich

Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Rolf Isermann \*\*

\* Institut für Automatisierungstechnik  
Technische Universität Darmstadt  
D-64283 Darmstadt, Landgraf-Georg-Straße 4  
Tel.: 06151-162214  
Fax: 06151-293445  
Email: ASchwarte@iat.tu-darmstadt.de

\*\* Institut für Automatisierungstechnik  
Technische Universität Darmstadt  
D-64283 Darmstadt, Landgraf-Georg-Straße 4  
Tel.: 06151-162114  
Fax: 06151-293445  
Email: RIsermann@iat.tu-darmstadt.de

**Schlüsselwörter:** Fehlerdiagnose, Fehlererkennung, Neuronale Netze, nichtlineare Identifikation, Rapid Control Prototyping, Motorsteuerung, On-Board-Diagnose.

Die steuerungs- und regelungstechnische Entwicklung des Verbrennungsmotors der letzten beiden Jahrzehnte ist gekennzeichnet durch eine umfassende elektronisch/mikroelektronische Prozessführung. Dies hat dazu beigetragen, dass der Verbrennungsmotor die steigenden Anforderungen bezüglich einer Verringerung der Abgasemissionen und des Verbrauchs bei gleichzeitiger Leistungssteigerung und mehr Komfort erfüllen kann. Die Komplexität des Verbrennungsmotors ist allerdings auch beträchtlich gestiegen und damit die Anforderungen an Werkstätten bezüglich Wartung und Reparatur. Zudem fordert der Gesetzgeber eine Überwachung aller abgasrelevanten Bauteile per On-Board-Diagnose (OBD). Weitere Überwachungsaufgaben dienen dem Bauteilschutz und der Rekonfiguration.

Durch Verwendung physikalischen und analytischen Prozesswissens in Form mathematischer Modelle ist eine exaktere Beschreibung des fehlerfreien Prozessnominalverhaltens möglich. Die höhere Aussagekraft der physikalisch basierten, modellgestützten Fehlererkennung ermöglicht so auf rechnerischem Weg eine bessere Eingrenzung und Lokalisierung von Fehlern bis hin zur eigentlichen Diagnose. Es werden zunächst die Grundlagen der modellbasierten Fehlererkennung und Fehlerdiagnose für technische Systeme dargestellt [1,2], siehe Abbildung 1. Diese Methoden werden eingesetzt, um ein modulares Gesamtdiagnosesystem für den Dieselmotor aufzubauen [3,6]. Für die einzelnen Teilsysteme Ansaugsystem, Einspritzung, Verbrennung und Triebwerk sowie das Abgassystem werden Fehlererkennungsmodule entwickelt. Jedes Fehlererkennungsmodul liefert eine Reihe von Symptomen, die durch Abweichen von Null einen Fehler anzeigen. Grundlage der modellbasierten Fehlererkennung bilden geeignete Modelle, die mit der beschränkten Information der gegebenen Sensoren das fehlerfreie Verhalten der einzelnen

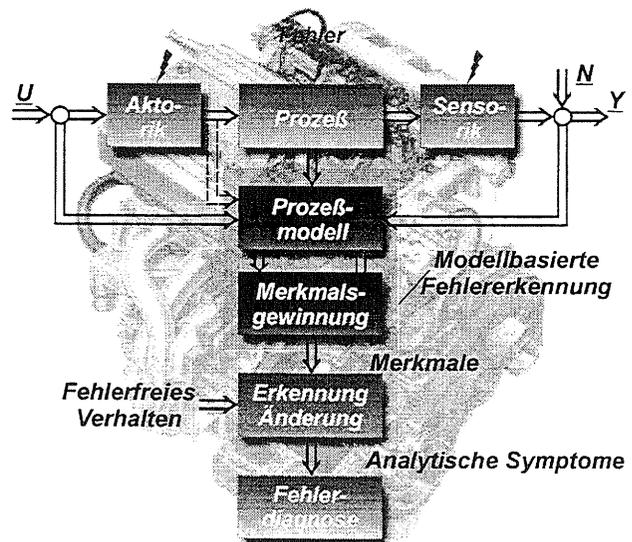


Abbildung 1: Modellbasierte Fehlerdiagnose mechatronischer Systeme

Teilsysteme ausreichend genau beschreiben.

Das Fehlererkennungsmodul *Ansaugsystem* basiert nur auf den serienmäßig vorgegebenen Sensoren HFM, Ladedruck, Ladelufttemperatur und Motordrehzahl. Ausgehend von einer physikalischen Modellbildung oder physikalischen Überlegungen werden vereinfachte Modelle und Signalmodelle hergeleitet. Die Kombination vereinfachter physikalischer Modelle mit dem speziellen Neuronalen Netz LOLIMOT führt dabei auf gute Ergebnisse, um das nichtlineare Ansaugverhalten des Motors und die Schwingungen des Luftmassenstromes sowie des Ladedrucks in Abhängigkeit des Betriebspunkts zu beschreiben [4,5]. Vorteil des Neuronalen Netzes LOLIMOT sind die schnelle Trainierbarkeit, Transparenz und die universellen Approximationseigenschaften, wobei auch großen Datenmengen aus einer kontinuierlichen Vermessung des Motors einfach handhabbar sind. Für den Einsatz in der Motorsteuerung können Kennfelder nachträglich mit dem LOLIMOT-Modell erzeugt werden. Die Implementation der Verfahren erfolgt auf einem dSPACE Rapid Control Prototyping Rechner zur online Verifikation.

Das Fehlererkennungsmodul *Einspritzung, Verbrennung und Triebwerk* basiert auf der Auswertung der Drehzahlschwingungen und des Sauerstoffkonzentrationssignals einer Lambda-Sonde. Durch Auswertung der Drehzahlschwingungen kann modellbasiert auf das Zylindermoment zurückgeschlossen werden und damit auch die Einspritzmenge rekonstruiert werden. In einem zweiten Verfahren kann die Einspritzmenge noch genauer und zylinderindividuell aus der Sauerstoffkonzentration rekonstruiert werden. Dies geschieht durch ein Verbrennungsmodell und ein Laufzeitmodell für die einzelnen Abgaspakete. Durch Vergleich der rekonstruierten Einspritzmengen mit der gesteuerten Einspritzpumpe kann auf verschiedene Fehler geschlossen werden.

Für das Fehlererkennungsmodul *Abgassystem* wurden zusätzlich ein Abgasgegendruck-, ein AGR-Temperatur- und ein AGR-Ventilhub-Sensor eingesetzt. Mit den Modellen für AGR-Massenstrom, Ladedruck und Abgasdruck können Turbinenfehler, Waste-Gate-Fehler, Leckagen im Abgassystem und eine Drosselung des Abgasstroms erkannt werden. Im zweiten Schritt der Fehlerdiagnose werden die Symptome aller Fehlererkennungsmodule zusammen ausgewertet, um die Fehlerursache einzugrenzen, und nach Möglichkeit eindeutig zu bestimmen. Die Verfahren können sowohl für die On-Board-Diagnose in Motorsteuergeräten als auch im Bereich der Werkstatt- und Wartungsdiagnose mit Off-Board-Testgeräten (Werkstattdiagnosesysteme) oder zur Bandendekontrolle eingesetzt werden.

### **Literatur:**

- [1] Isermann, R.: Diagnosis Methods for Electronic Controlled Vehicles. 5<sup>th</sup> International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC 2000). Ann Arbor, Michigan 2000.
- [2] Isermann, R.: Modellgestützte Überwachung und Fehlerdiagnose Technischer Systeme. atp- Automatisierungstechnische Praxis 38 5/6 1996.
- [3] Kimmich, F., Schwarte, A., Isermann, R.: Modellbasierte Fehlerdiagnose am Dieselmotor. 10. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik. Aachen 2001.
- [4] Nelles, O.: Nonlinear System Identification with Local Linear Neuro-Fuzzy Models. Darmstädter Dissertation. Shaker Verlag, Aachen 1999.
- [5] Schwarte, A., Isermann, R.: Neural Network Applications for Model Based Fault Detection with Parity Equations. IFAC 15<sup>th</sup> World Congress. Barcelona 2002.
- [6] Schwarte, A., Kimmich, F., Isermann, R.: Modellbasierte Fehlererkennung und -diagnose für Dieselmotoren. Motorentechnische Zeitschrift MTZ 63 Nr.7/8 2002.

# Methoden zur Führung von unbemannten Unterwasserfahrzeugen

Mike Eichhorn

Fakultät für Informatik und Automatisierung  
Fachgebiet Systemanalyse  
Technische Universität Universität  
PF 100565  
D-98684 Ilmenau  
Tel. +49 3677 691421  
Fax +49 3677 691434  
Email Mike.Eichhorn@TU-Ilmenau.de

**Schlüsselwörter:** AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*), Ausweichstrategie, Hindernisvermeidung, Virtuelle Realität

Der vorliegende Beitrag stellt ein Teilgebiet aus dem aktuellen BMBF - Forschungsprojekt „DeepC“ vor, in welchen die Technischen Universität Ilmenau Aufgaben im Bereich Softwareentwicklung und Projektmanagement bearbeitet. Ziel von „DeepC“ ist die Entwicklung eines AUV's (*Autonomous Underwater Vehicle*) [1] für große Tauchtiefen (Missionstiefe 4000 m). Dieses Unterwasserfahrzeug soll in der Lage sein, selbständig eine vorgegebene Mission durchzuführen und bei unvorhergesehenen Situationen (auftauchende Hindernisse, Ausfall von Baugruppen) eigenständig zu handeln (siehe Abbildung 1).

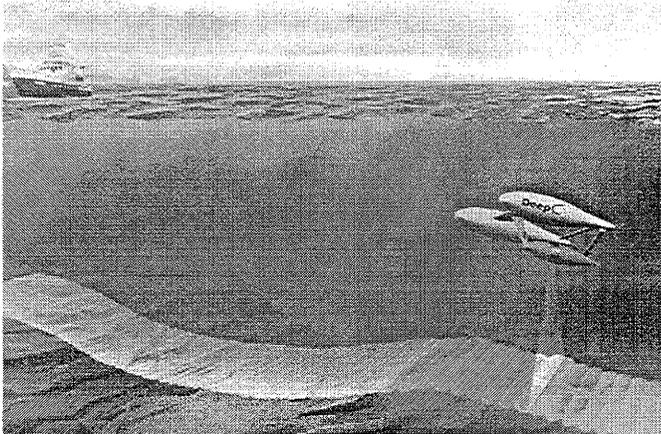


Abbildung 1: DeepC

Im ersten Teil des Beitrages erfolgt eine kurze Vorstellung des Projektes bezüglich der beteiligten Partner, der Aufgaben und der Ziele. Eine technische Beschreibung des zu entwickelnden Fahrzeuges mit seinen wichtigsten Leistungsparametern schließen diesen Teil ab. Das in diesem Beitrag vorgestellte Teilprojekt beschäftigt sich mit der Entwicklung von Algorithmen, zur Führung des Fahrzeuges in Sondersituationen.

Die Führung des Fahrzeuges ist in eine Mehrebenenstruktur aufgebaut [2]. Im Normalfall arbeitet das Fahrzeug einen Mission-/Manöverplan ab. Dieser Plan enthält Positionswerte und Bahnen, welche das Fahrzeug in einer vorgegebenen Reihenfolge abzufahren hat. Dabei werden definierte Vorgaben zur Führung des Fahrzeuges in Form von Sollposition, -lage, -bahn und -geschwindigkeit an den Autopiloten übergeben. Dies ist vergleichbar mit der vollautomatischen Führung eines Passagierflugzeuges durch einen Flugmanagementrechner. Tangieren Hindernisse die Sollbahn des Fahrzeuges, muss die automatische Führung durch Algorithmen abgelöst werden, welche nun die Fahrzeugführung übernehmen. Diese Situation ist in Analogie mit der manuellen Führung eines Flugzeuges durch einen Kapitän zu sehen.

Eine andere Sondersituation besteht in der Identifikation von unbekanntem Objekten während einer Mission. Eine Identifikation kann eine visuelle oder kartographische Erfassung des Objektes und/oder eine Bestimmung seiner physikalischen/chemischen Eigenschaften beinhalten. Um eine Identifikation durchführen zu können, muss das Fahrzeug eine definierte Lage zum Objekt einnehmen und während der Identifikation halten. Bei großräumigeren Objekten hat das Fahrzeug das zu identifizierende Objekt in einem definierten Abstand und in einer vorgegebenen Lage zu umfahren. Die Steuerung des Fahrzeuges wird hierbei von speziellen Algorithmen zur Positionierung und Führung des Fahrzeuges übernommen.

Das in diesem Beitrag vorgestellte Konzept zum Ausweichen von Hindernissen besteht aus einer zwei Ebenen Struktur (siehe Abbildung 2). Die erste Ebene verwendet zusätzlich zu den Informationen des Sonars die Daten einer digitalen Seekarte. Ein optimaler Weg vorbei an den Hindernissen zur aktuellen Sollbahn wird in dieser Ebene auf der Basis von graphenbasierten Algorithmen [3], [4] bestimmt.

In einer 2. Ebene wird ein Fuzzysystem eingesetzt. Dieses System reagiert auf die im Sonar aufgefassten Hindernisse durch entsprechende reaktive Steuerkommandos. Das Regelwerk dieses Fuzzysystems wird aus aufgenommenen Testfahrten in der virtuellen Realität [5] unter Verwendung von Lernalgorithmen [6], [7] generiert.

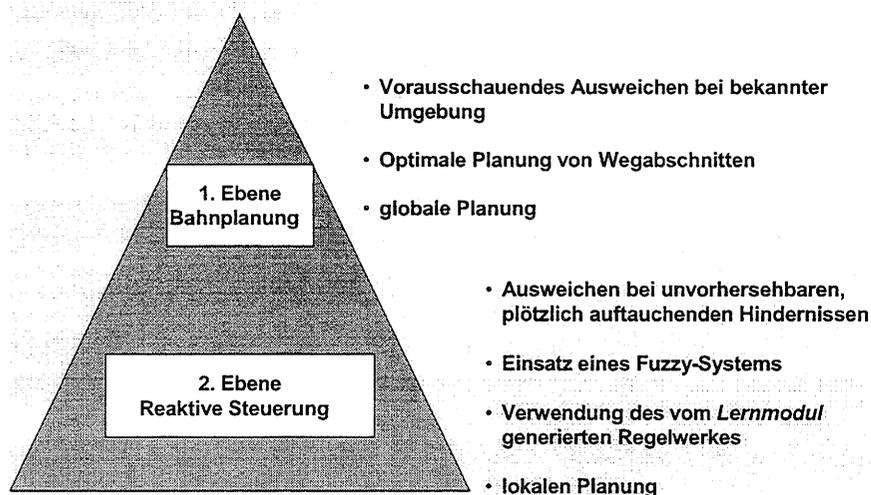


Abbildung 2: Struktur des Hindernisvermeidungssystems

Die Algorithmen zur Fahrzeugführung bei Identifikationsaufgaben basieren auf fuzzygestützte Regelungskonzepte [8], [9]. Da eine analytische Bestimmung der Reglerparameter durch die nichtlineare Streckencharakteristik und das gewählte Regelungskonzept nicht möglich ist, erfolgt der Entwurf mit der FCD-Toolbox [9].

## Literatur:

- [1] <http://www.deepc-auv.de/deepc/DeepC.htm>
- [2] Brutzman, D.; Healey T. Marco, D. MxGhee, B.: The Phoenix Autonomous Underwater Vehicle. In Kortenkamp, D., Bonasso, P., & Murphy, R., editors, AI-Based Mobile Robots, chapter 13. MIT/AAAI Press. 1997
- [3] Dijkstra, E.W.: A Note on Two Problems in Connection with Graphs. Numerische Mathematik, Vol. 1, Springer-Verlag, Berlin, 1959.
- [4] Stentz, A.: Optimal and Efficient Path Planning for Partially – Known Environments Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA '94), Vol. 4, May, 1994, pp. 3310 - 3317
- [5] <http://www-kismet.iai.fzk.de>
- [6] Otto, P.;Wernstedt, J.:Fuzzy Methods for the Optimal Emulation by Expert Decision Behaviour and for the Optimal Controller Design. Proceedings of the 10<sup>th</sup> Zittau Fuzzy Colloquium 4-6 September, 2002 Zittau, pp. 351-367
- [7] Eichhorn, M.: Control Tasks in the Development of Underwater Vehicle, NRC IMD Seminars, Institute for Marine Dynamics, National Research Council Canada, St. John's, Newfoundland, Canada, November 12, 2002
- [8] Eichhorn, M.; Pfützenreuter, T.;Schmidt, M.; Waltl, B.: Modelling, Control and Navigation of Semiautonomous, Remotely Operated Underwater Vehicles, at - Automatisierungstechnik, 2001, Volume 49, Issue 08, p.373
- [9] Eichhorn, M.; Kuhn, T.: Fuzzy Control Design Toolbox, User Manuals, SCIENTIFIC COMPUTERS, München, 1996.

# Entwicklung eines navigierten Chirurgieroboters zur Unterstützung bei orthopädischen Eingriffen

Peter Knappe

Institut für Regelungs- und Steuerungstechnik,  
 Leitung Prof. Dr.-Ing. Hubert Roth  
 Universität Siegen  
 Hölderlinstr. 3, 57068 Siegen  
 Tel. 0271 740 4693  
 Fax 0271 740 2336  
 Email knappe@zess.uni-siegen.de

**Schlüsselwörter:** Medizinroboter, Sensorgeführte Roboter, Navigation, Mensch-Maschine-Interaktion, Kraftregelung, Haptik

Im Allgemeinen werden die Mehrzahl von chirurgischen Eingriffen heute noch vollständig von Hand durchgeführt. Der immer lauter werdende Ruf nach qualitätssichernden Systemen auch in diesem Bereich lässt jedoch verstärkt den Wunsch nach technischen Hilfsmitteln aufkommen, mit denen chirurgische Eingriffe reproduzierbarer umgesetzt werden können. Derzeit verfügbare kommerzielle Systeme werden diesem Wunsch nur zum Teil gerecht. Einige, die sogenannten Navigationssysteme, unterstützen den Chirurgen visuell und haben somit nur einen indirekten Einfluss auf das Operationsergebnis. Andere aktiv unterstützende Systeme, z.B. die derzeit verfügbaren Operationsroboter, können nicht auf Veränderungen in ihrer Umgebung, wie z.B. kleine Patientenbewegungen reagieren und sind von ihrem Anwendungskonzept nur schwer in den Operationsablauf zu integrieren.

Der in diesem Beitrag vorgestellte Ansatz beschreibt ein neuartiges interaktives, navigationsunterstütztes, d.h. sensorgeführtes Chirurgierobotersystem. Das System kombiniert ein optisches 3D/6D-Digitalisiersystem zur Erfassung von Position und Orientierung von Körpern im Raum mit einem Robotersystem, das zur Führung der chirurgischen Werkzeugen verwendet wird [1]. Ein Computersystem synchronisiert und steuert die Aktivitäten der beiden Komponenten. Auf einem Echtzeitrechner werden die Transformationsmatrizen zwischen den verschiedenen Koordinatensystemen (Abbildung 1) der Einzelkomponenten berechnet sowie die Positionsregelung und die Bahnplanung durchgeführt. Ein weiterer Computer dient als Visualisierungs- und Planungsstation. Die Zielposition für den Roboter wird bildgestützt aus einer auf CT- oder Röntgenbildern basierenden präoperativen Planung gewonnen. Intraoperativ wird eine charakteristische Knochenpartie mittels eines Pointers, dessen Position durch das Digitalisiersystem im Raum ermittelt wird, abgetastet und die Abtastung anschließend mit den präoperativen Bilddaten gematched. Hierdurch wird das Ziel im Koordinatensystem des Digitalisiersystems bekannt. Vor der Abtastung muss ein Referenzframe des Digitalisiersystems rigide mit der zu operierenden Knochenstruktur verbunden

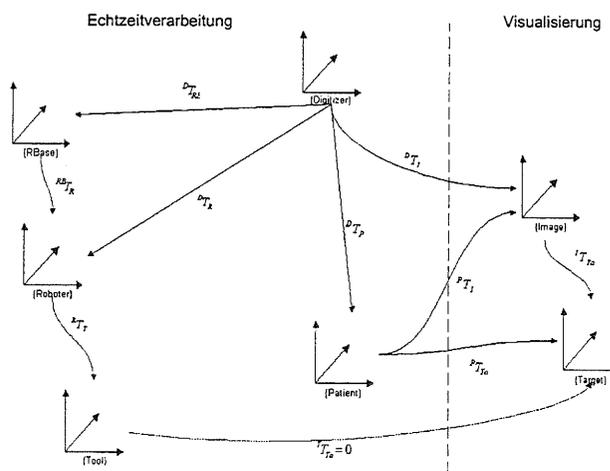


Abbildung 1: Koordinatensysteme

werden um den Bezug von realem Ziel zur Planung bei Patientenbewegungen oder Bewegungen des Digitalisiersystems nicht zu verlieren. Über ein zusätzliches Referenzframe am Flansch des Roboters wird die Roboterposition im Koordinatensystem des Digitalisiersystems gemessen. Die Geometrie des an dem Flansch montierten Werkzeuges ist bekannt. Hierdurch ist es nun möglich, den TCP des Werkzeuges exakt an die Zielposition zu steuern und durch die kontinuierliche Messung der Pose von Roboter und der Pose des Patienten eventuell auftretende Patientenbewegungen auszuregulieren. Ein weiterer Vorteil ist, dass ein nicht kalibrierter Roboter verwendet werden kann, da die absolute Genauigkeit des Roboters hier keine Rolle mehr spielt. Die bereits erwähnte interaktive Komponente wird durch ein modulares Werkzeugsystem [2] auf der einen Seite und eine kraftgeführte Positionsregelung auf der anderen Seite realisiert. Das Design der chirurgischen Werkzeuge des modularen Werkzeugsystems ist eng an die in der manuellen Chirurgie verwendeten Tools angelegt. Der Roboter dient hierbei lediglich als Positionierhilfe und schränkt den Bewegungsbereich der Werkzeuge ein. Im Zielgebiet werden die Werkzeuge vom Chirurgen per Hand bedient, so dass dieser immer die volle Kontrolle behält. Über einen Kraft-Momenten-Sensor am Flansch des Roboters kann der Roboter direkt am Werkzeug angefasst und zum Zielgebiet per Hand, d.h. haptisch geführt werden. Hierdurch wird das Kollisionsrisiko zwischen Roboter, Personal und Geräten drastisch verringert. Das Robotersystem verfügt über eine automatische Werkzeu-erkennung. Je nach montiertem Werkzeug werden unterschiedliche Regelalgorithmen für die Positionsregelung geladen. Bei bestimmten Werkzeugen werden zusätzlich zu den Daten des Digitalisiersystems die Daten des Kraft-Momenten-Sensors für die Positionsregelung verwendet. Ein Blockschaltbild der einzelnen Komponenten des Systems ist in Abbildung 2 dargestellt. Ein erster Prototyp des navigierten Chirurgieroboters wurde bereits fertiggestellt und Ende Juli 2002 erfolgreich klinisch getestet. Mit Hilfe des beschriebenen Systems wurde an der Universitätsklinik in Frankfurt erstmals weltweit einem Patienten eine künstliche Hüftgelenkspfanne mit Roboterunterstützung implantiert.

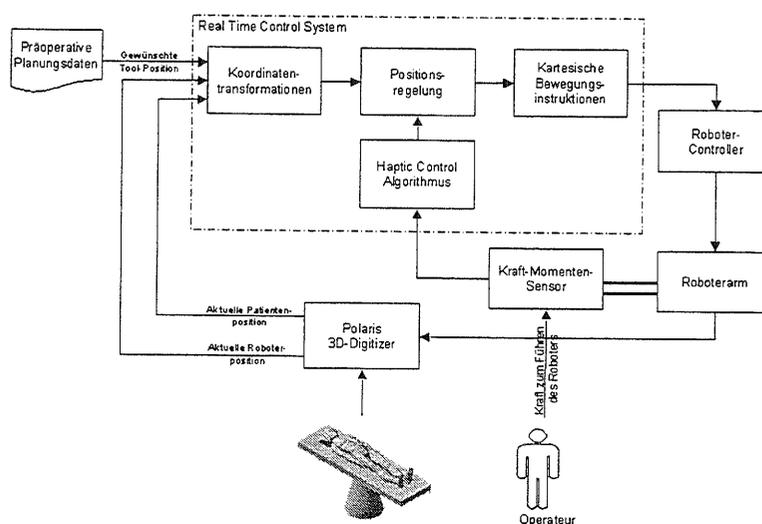


Abbildung 2: Blockschaltbild des Systems

## Literatur:

- [1] Wahrburg, J.; Kerschbaumer, F.: "Design of a robotic system to support the acetabular cup implantation in total hip replacement procedures", in: Lemke, H.U. et. al. (Hrsg.), CARS 2000 – Computer Assisted Radiology and Surgery, Proceedings of the 14<sup>th</sup> International Congress, San Francisco, 28 June – 1 July 2000, Elsevier, Amsterdam 2000, pp. 220-225
- [2] Wahrburg, J, Knappe, P.; A modular mechatronic tool-system for robot assisted surgical interventions; IEEE International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice M<sup>2</sup>VIP 2001; Hong Kong, China; 27-29 August 2001

# Steuerungs- und Regelungskonzepte für eine myoelektrische Handprothese

Sebastian Beck, Markus Reischl, Georg Bretthauer

Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Institut für Angewandte Informatik,  
D-76021 Karlsruhe, Postfach 3640,

Telefon: (07247) 82-5749, Fax: (07247) 82-5786, E-Mail:  
{beck;reischl;bretthauer}@iai.fzk.de

## Vortragskurzfassung

Steuerbare Handprothesen (Funktionsprothesen) werden gegenwärtig durch Muskelaktivitäten im Armstumpf des Prothesenträgers bedient. Dabei werden sogenannte myoelektrische Signale erfasst und durch Schwellwertdetektionen Bewegungsabsichten des Anwenders erkannt. Die Geschwindigkeit der Öffnungs- bzw. Schließbewegung der Prothese hängt von der Intensität des myoelektrischen Signals ab. Die wesentlichen Nachteile kommerzieller Prothesen sind die geringe Anzahl an Bewegungen (Öffnen / Schließen beziehungsweise Drehung des Handgelenks) und nur eingeschränkte Möglichkeiten der Kraftregelung. Weiterhin erhält der Patient keine Rückkopplung über den Objektkontakt.

Die hydraulisch angetriebene Handprothese des Forschungszentrums Karlsruhe (FZK) ermöglicht eine Vielzahl unterschiedlicher Griffe aufgrund hochbeweglicher, flexibler Fluidaktoren. Die Auswahl der damit möglichen Griffarten erfordert allerdings die Erweiterung bestehender Ansteuerungskonzepte.

Um Patienten an eine erweiterte, myoelektrische Steuerung zu gewöhnen, wurde eine Plattform entworfen, um myoelektrische Steuerungskonzepte individuell anzupassen. So ist es möglich, spielerisch Kontraktionsmuster für die verschiedenen Bewegungen zu erlernen und anschließend in einer Simulationsumgebung die Prothesensteuerung zu trainieren. Die dabei gewonnenen Daten dienen zur Adaption von Struktur und Parametern des Steuerungskonzeptes. Nach abgeschlossener Lernphase werden die individuell angepassten Algorithmen auf einem Mikrocontroller implementiert.

Eine Positionsregelung zur exakten Ausführung der gewählten Handbewegungen wird über einen Fuzzy-adaptiven PD-Regler realisiert. Um den Kontakt der Prothese mit dem zu greifenden Objekt zu detektieren, wird ein mathematisches Modell des einzelnen Fingergelenkes erstellt. Dabei werden Störmomente u.a. über einen Beobachter im Zustandsraum geschätzt. Auf diese Weise kann auf zusätzliche Kraftsensoren in der Hand verzichtet werden. Das mathematische Modell des hydraulischen Systems basiert auf theoretischen Betrachtungen, einem entsprechenden Struktur-entwurf und der Validierung anhand von experimentellen Erkenntnissen.

In dem Vortrag werden die individuellen Steuerungskonzepte zur Auswahl komplexer Bewegungen sowie zur Erkennung von Objektkontakt und zur Kraftregelung vorgestellt und die bisher damit erhaltenen Ergebnisse diskutiert.

# Verbesserung der Regelung von Auto-nCPAP-Geräten

T. Netzel

Institut für Automatisierungstechnik  
Universität der Bundeswehr Hamburg  
Holstenhofweg 85, 22043 Hamburg  
Tel.: +49/40 6541 3424  
Fax: +49/40 6541 3633  
Email: [Thomas.Netzel@unibw-hamburg.de](mailto:Thomas.Netzel@unibw-hamburg.de)

**Schlüsselwörter:** Obstruktive Schlafapnoe, Auto-nCPAP

Die obstruktive Schlafapnoe (OSA) ist eine schlafbedingte Atemwegserkrankung, die durch das Erschlaffen der Zungengrund- und Mundbodenmuskulatur während des Schlafs entsteht und zum vollständigen Kollaps der oberen Atemwege führt. Treten die so verursachten Atemaussetzer für mindestens 10 Sekunden auf und führen sie zum Absinken der arteriellen Blutsauerstoffsättigung um mindestens 4 Prozent, so spricht man von einer OSA [1].

Die Erkrankung führt zur Fragmentierung der Schlafstruktur, einer erheblichen Belastung des Herz- Kreislaufsystems und einer Sauerstoffunterversorgung des Gehirns. Die Folgen reichen von Tagesmüdigkeit über Bluthochdruck, einer erhöhten Herzinfarktneigung bis hin zu hypoxiebedingten Schädigungen des zentralen Nervensystems.

Als Standardmethode zur Behandlung der OSA setzte sich die nasale Überdruckbeatmung bei konstantem Druck (nCPAP) durch. Zur Verbesserung des Behandlungskomforts wurden Geräte entwickelt, die den Beatmungsdruck abhängig vom Obstruktionsgrad automatisch einstellen. Die dazu notwendige Erkennung von Obstruktionen erfolgt herstellerabhängig auf verschiedene Weisen, wobei Fehlregelungen auftreten können [2]. Diese führen dazu, dass der Beatmungsdruck falsch eingestellt wird. Ist er zu hoch, führt das zu einer Verringerung des Behandlungskomforts, ist er zu niedrig, so ist der Erfolg der Behandlung gefährdet.

Deshalb ist es notwendig, ein auf der Druck- und Durchflussmessung basierendes, weitgehend artefaktunempfindliches Parameterset zu finden, das es gestattet, die obstruktive Schlafapnoe eindeutig und frühzeitig zu erkennen und sie dann durch eine geeignete Regelung auch in Extremfällen bei einem möglichst geringen Beatmungsdruck zu verhindern.

Dazu wurden in Kooperation mit dem Schlaflabor des AK St. Georg in Hamburg und der Firma Weinmann polysomnographische Messungen an Patienten unter nCPAP mit einem SOMNOsmart<sup>®</sup> durchgeführt, wobei zusätzlich der Maskendruck und der Fluss am Geräteausgang des SOMNOsmart<sup>®</sup> sowie der CO<sub>2</sub>-Partialdruck in der Maske mit Hilfe eines Industrie-PC aufgezeichnet wurden.

Zur Bestimmung des Obstruktionsgrads wurde das im SOMNOsmart<sup>®</sup> angewandte Verfahren der forced oscillation technique (FOT) direkt übernommen und ein normierter Obstruktionsparameter ( $F_1$ ) definiert, der eine Aussage über den aktuellen Obstruktionsgrad in Bezug auf vorherige Obstruktionsgrade liefert. Bei bekannter Schlauch-Masken-Kombination ist auch die direkte Bestimmung des Betrags der oszillatorischen Atemwegsimpedanz bzw. Admittanz möglich.

Zur Beschreibung des Inspirationsflussbedarfs wurde ein Parameter gefunden, der mit dem endexpiratorischen CO<sub>2</sub>-Partialdruck  $p_{et}CO_2$  korreliert ( $F_2$ ) und damit eine Aussage über Über- oder Unterversorgung des Körpers mit Atemluft beschreibt [3].

Aufgrund der hohen Komplexität der mathematischen Modellierung des Übertragungsverhaltens des menschlichen Atemtrakts unter nCPAP wurde dessen Identifikation durchgeführt. Als Eingangssignal wurden Solldrucksprünge, als Ausgangssignal wurde der tiefpassgefilterte Betrag der oszillatorischen Atemwegsadmittanz  $|L|$  gewählt. Da der inspiratorische Fluss maßgeblich von der Atemanregung abhängt, die nicht vom Beatmungsassistenten gemessen wird, ist eine Identifikation der Flussübertragungsfunktion unter nCPAP nicht möglich.

Die Identifikation erfolgte mit der rekursiven Methode der kleinsten Quadrate mit konstantem Gedächtnisfaktor. Die Modellordnung wurde durch Verlustfunktionstest bestimmt. Dabei zeigte sich, dass das Übertragungsverhalten mit einem Modell 1. Ordnung ausreichend beschrieben wird.

Da sich die Kollapsibilität der Atemwege zeitlich ändert, wurde für die Regelung von  $|L|$  ein robuster PI-Regler gewählt. Aufgrund seiner Artefaktempfindlichkeit wurde zusätzlich ein Fuzzy-Regler eingesetzt, der  $F_1$  und  $F_2$  als Eingangsgrößen und die zeitliche Ableitung des Solldrucks als Ausgangsgröße nutzt. Die Umschaltung zum Fuzzy-Regler erfolgt, wenn das inspirierte Atemminutenvolumen außerhalb dynamischer Toleranzgrenzen liegt oder wenn Atemwegsimpedanzartefakte detektiert werden. Treten gleichzeitig Atemfrequenzartefakte auf, so bleibt der Beatmungsdruck konstant.

Bei der Untersuchung der Regelung im Schlaflabor an OSA-Patienten zeigte sich, dass der PI-Regler den Beatmungssolldruck so einstellt, dass entstehende Obstruktionen frühzeitig therapiert werden. Aufgrund der Variabilität des Atemwegsquerschnitts innerhalb jedes Atemzugs variiert auch der Beatmungssolldruck, was einen wünschenswerten Effekt darstellt, der aber durch die Dynamik des Stellglieds begrenzt ist.

Der Fuzzy-Regler stellt bei geringerer Dynamik den Beatmungsdruck so ein, dass bei Erreichen einer ausreichenden Luftversorgung der Druck konstant gehalten wird. Aufgrund der gewählten Regelbasis werden auch zentrale Ereignisse durch eine Druckerhöhung therapiert. Das Wiedereinsetzen der Atmung führt zur Druckabsenkung. Es zeigt sich, dass Atemwegsimpedanzartefakten wie Husten und Räuspern eine Absenkung des Beatmungsdrucks folgt. Trotz teilweise geringem Beatmungsdruck und auftretender Artefakte ist kein obstruktionsbedingter Abfall der arteriellen Blutsauerstoffsättigung zu beobachten.

## Literatur

- [1] Schulz, H.: Kompendium Schlafmedizin für Ausbildung, Klinik und Praxis. Landsberg: ECOMED 1997.
- [2] Farré, R.; Montserrat, J. M.; Rigau, J.; Trepát, X.; Pinto, P.; Navajas, D.: Response of Automatic Continuous Positive Airway Pressure Devices to Different Sleep Breathing Patterns. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, Bd. 166, 2002, S. 469-473.
- [3] Netzel, T.: Design of a new controller to treat the obstructive sleep apnoea. Proceedings of SPIE, Smart Nondestructive Evaluation for Health Monitoring of Structural and Biological Systems VII, Bd. 4702, San Diego, USA, 2002.

# Möglichkeiten zur Verbesserung der Positionsbestimmung am Beispiel der Satellitennavigation

Dipl.-Ing. Michael Gluch\*

Telematica e.K.\*

R.-Wagner-Str. 31  
Tel. 0381 498 3706  
Fax. 0381 498 3563

Email: telematica.mgluch@t-online.de

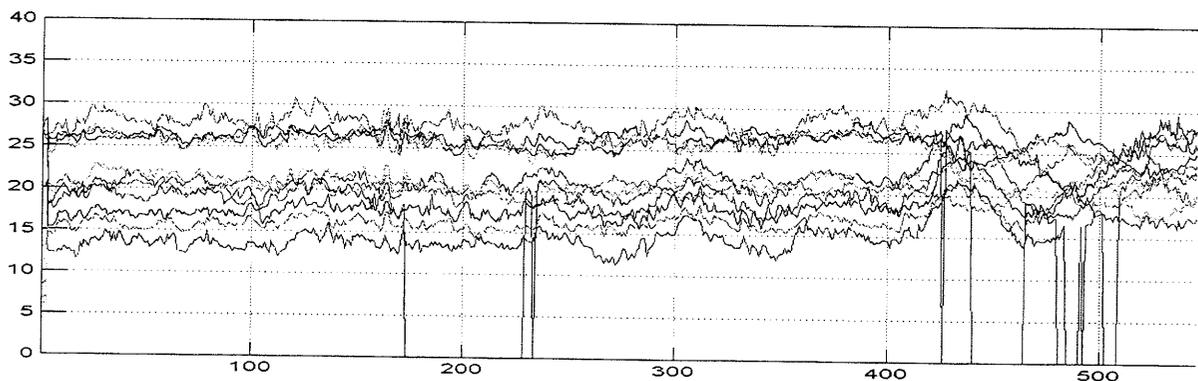
Prof. B. Lampe\*\*

\*\*Institut für Automatisierungstechnik  
Universität Rostock  
R.-Wagner-Str. 31  
Tel. 0381 498 3562  
Fax. 0381 498 3563

Email: Bernhard.Lampe@etechnik.uni-rostock.de

**Schlüsselwörter:** Satellitennavigation, GPS&GLONASS, Positionsbestimmung

Die Navigation mittels Satelliten ist seit einigen Jahren fester Bestandteil von industriell entwickelten Gesellschaften. Das 1996 offiziell frei gegebene GPS Navigationssystem etablierte sich im professionellen Anwenderbereich zur Steuerung von Flugzeugen und Seeschiffen und drang dabei bis in den privaten Anwenderkreis von Autofahrern, Freizeitkapitänen der See- und Luftstraßen vor. Immer dann, wenn eine Positionsbestimmung gebraucht wird, ist die Verwendung von GPS-Empfängern im Gespräch. Kaum einer der Nutzer kennt jedoch die Probleme bei der kontinuierlichen Positionsbestimmung in der Satellitennavigation, welche nicht nur technische, sondern insbesondere physikalische Ursachen haben. Diese Ursachen sind in der Regel Abschattungen und Mehrwegeausbreitungen des Satellitensignals. Dazu kommen Fehlereinflüsse der Luftschichten Iono- und Troposphäre, welche bei der angestrebten Genauigkeit von unter 10 Meter teilweise nur ungenügende Nachbildungsgenauigkeiten aufweisen. Ein weiteres Problem stellt die exakte Synchronisation der Empfängeruhr auf die GPS-Systemzeit dar. Geringfügige Abweichungen bei der Schätzung der Zeit am Empfänger haben automatisch einen Genauigkeitsverlust der Positionslösung zur Folge. Exemplarisch steht hierfür *Abbildung 1*.



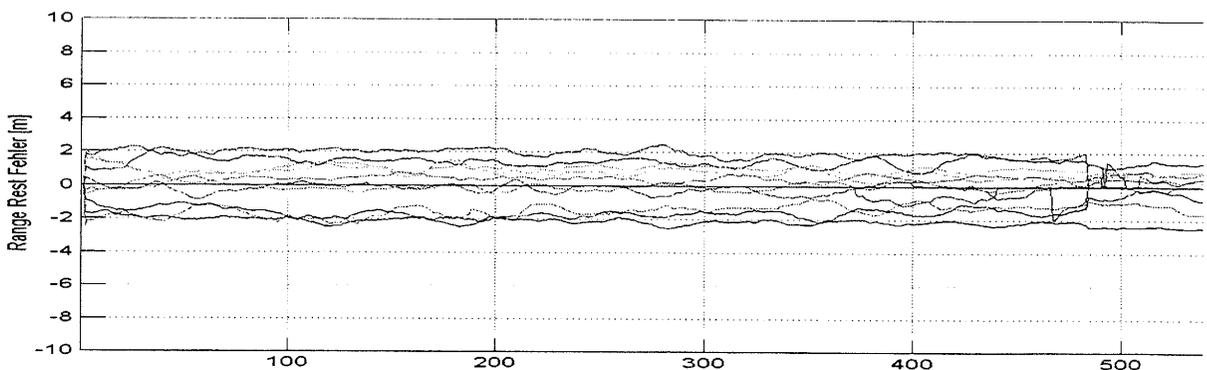
*Abbildung 1* Rangerestfehler einer SatNav-Positionslösung

Von besonderer Bedeutung für die Automatisierung des Navigationsprozesses ist jedoch der Erhalt von Satellitenkonstellation mit hinreichenden Standliniengeometrien, damit die Positionsbestimmung verlässliche Positionsgenauigkeiten erzeugen kann. Leider ist es in der Realität so, dass genau diese Voraussetzungen eher nicht gegeben sind. In Satellitennavigationsempfängern wird deshalb mit Filtern gearbeitet, die drastische Veränderungen in der Positionslösung verhindern sollen. Das Benutzen von Filtertechniken in den Empfängern

verschlechtert die Positionsgenauigkeit und letztlich wird die Bahn, auch aufgrund der Standliniengeometrie, verfälscht. Zur Erhaltung der Standliniengeometrie müssten die Pseudorangemessungen (Laufzeitmessungen des Satellitensignals zur Nutzerantenne) selbst erhalten bleiben. Bei einer Abschattung müsste deshalb die Rangemessung bestimmt vorhergesagt werden, was in der Vergangenheit, auf Grund der systematischen Fehlereinflüsse, ohne Zusatzsensorik kaum gelang.

Mit dem INIS II Gesamtsystem [1] steht zurzeit eine Simulationsumgebung zur Verfügung, welche einen Großteil der systematischen Fehlereinflüsse bis in den angestrebten Genauigkeitsbereich hinein nachbilden kann. Wenn man also in der Lage ist, eine synthetische Range zum Zeitpunkt  $t$  zu erzeugen, dann stellt sich die Frage, ob eine Vorhersage von fehlenden Rangemessungen, auf dieser Basis nicht gleichermaßen vollzogen werden kann.

Der bekannte Algorithmus aus dem ICD wurde entsprechend der Idee weiterentwickelt und ausführlich getestet, wobei eine Reihe von positiven Ergebnissen erzielt werden konnte (*Abbildung 2*). Mit Hilfe des Algorithmus lassen sich Signalausfälle einzelner Satelliten sehr gut überbrücken. Die überbrückten Zeiträume konnten bis auf 60 Sekunden, bei ausreichender Messdatendichte, ausgedehnt werden. Damit ergibt sich eine verbesserte Standliniengeometrie und somit auch eine verbesserte Positionslösung. Jedoch ist darauf zu achten, dass die Anzahl der gemessenen Standlinien nicht kleiner als vier ist, wenn der Uhrenfehler und die Geschwindigkeit des bewegten Objektes nicht anderweitig geschätzt werden. Unter der Voraussetzung einer guten Geometrie dieser vier Standlinien, wird der Uhrenfehler annähernd richtig berechnet und damit ist der Vorhersagealgorithmus erfolgreich. Je schlechter dieser Uhrenfehler berechnet wird, desto schlechter sind auch die Ergebnisse der Positionsbestimmung. An dieser Stelle sind weitere Untersuchungen zur Schätzung des Uhrenfehlers notwendig.



*Abbildung 2 Rangerestfehler nach dem Einsatz des Algorithmus*

Die ersten Ergebnisse, die mit dem Algorithmus zur Rangerestvorhersage erzielt wurden, sind sehr viel versprechend. Der Ansatz wurde in MATLAB und SIUMLINK umgesetzt und steht der Universität Rostock zur Verfügung. Weitere Untersuchungen mit diesem Algorithmus sind empfehlenswert.

### Literatur:

- [1] M.Gluch; M.Herzig; B.Lampe; „Schlussbericht INIS II“ F&E Vorhaben „Entwicklung von Softwarestrukturen für integrierte Navigationsempfänger in der Seeschifffahrt“, FKZ 50ND9803/0, Juni 2002
- [2] „Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interfaces (ICD-GPS-200)“, US Coast Guard Navigation Center, Alexandria USA, 1995

# Durchsatzmaximierung für High-Throughput-Screening Prozesse

E. Mayer <sup>a</sup>

J. Raisch <sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Fachgruppe System- und Regelungstheorie  
Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme

Sandtorstraße 1, 39106 Magdeburg

Tel.: +49/391/6110 378

Fax: +49/391/6110 399

Email: eckart.mayer@mpi-magdeburg.mpg.de

<sup>b</sup> Lehrstuhl für Systemtheorie technischer Prozesse  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Postfach 4120, 39016 Magdeburg

Tel.: +49/ 391/67 18708

Fax: +49/ 391/67 11191

Email: raisch@mpi-magdeburg.mpg.de

**Schlüsselwörter:** High-Throughput-Screening, gemischt-ganzzahlige Optimierung, zyklische Prozesse, Scheduling.

Anlagen für das High-Throughput-Screening (HTS) werden zur Suche pharmazeutischer oder biologischer Wirkstoffe eingesetzt. Sie ermöglichen es, eine große Zahl von Substanzen auf bestimmte Eigenschaften zu testen. Obwohl bis zu 1500 Proben auf einer Mikroplatte (Batch) zusammengefasst sind, muss eine große Zahl solcher Platten in möglichst kurzer Zeit die Anlage (bestehend aus Liquid-Handling, Inkubatoren, Transporteinheiten, etc.) durchlaufen.

Die zeitliche Planung eines solchen Ablaufs stellt ein Scheduling-Problem dar. Es unterscheidet sich von anderen Scheduling-Problemen (z.B. [2],[3],[5]) durch die Kombination der folgenden Eigenschaften/Anforderungen:

- Dieselbe Ressource kann in verschiedenen Bearbeitungsschritten zum Einsatz kommen.
- Es bestehen keine Speicher zwischen den Ressourcen. Ein Batch wird bei der Übergabe von einer Ressource zur nächsten vielmehr sogar beide Ressourcen gleichzeitig belegen.
- Alle Batches müssen das System im exakt gleichen zeitlichen Bearbeitungsschema durchlaufen.
- Der Nutzer gibt untere und obere Schranken für bestimmte Zeitintervalle vor ('time window constraints').

Spezialisierte Scheduling-Verfahren sind für bestimmte HTS-Anlagen bekannt (z.B. [1],[4]). Der Wunsch nach größerer Flexibilität (sowohl bezüglich der vorgegebenen zeitlichen Abläufe als auch bezüglich der physikalischen Anordnung der Komponenten) erfordert jedoch zunehmend auch den Einsatz allgemeiner Verfahren.

Aufgrund bestimmter Stoffeigenschaften werden häufig *zyklische* Abläufe gefordert. Dieser Beitrag stellt ein Verfahren vor, mit dem eine global optimale Lösung für das zyklische HTS-Scheduling-Problem ermittelt werden kann. Die Aufgabe der *Durchsatzmaximierung* entspricht für zyklisch wiederholte Abläufe der *Minimierung* der Taktzeit. Ein Beispiel für einen zyklischen Ablauf ist in Abbildung 1 und 2 gegeben: Abb. 1 zeigt das zeitliche Bearbeitungsschema eines Batches, Abb. 2 einen zugehörigen zeitlichen Ablaufplan.

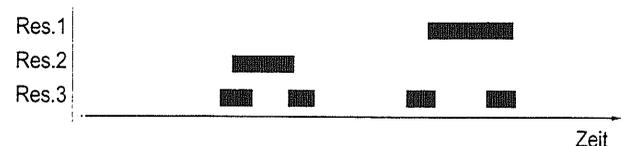


Abb. 1: Zeitschema eines Batches (Gantt-Chart).

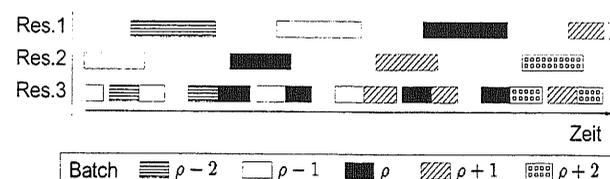


Abb. 2: Zyklischer Ablaufplan für Schema aus Abb. 1.

Das Verfahren basiert auf einem mathematischen Modell des zyklischen Ablaufs. Durch eine geeignete lineare Transformation kann die Dimension des Problems deutlich verringert werden. Man erhält ein gemischt-ganzzahliges nichtlineares Optimierungsproblem (MINLP), das sich durch eine weitere Transformation in ein lineares Problem (MILP) umwandeln läßt. Letzteres ist mit den Verfahren der linearen gemischt-ganzzahligen Optimierung (z.B. [6]) innerhalb weniger Sekunden lösbar. Die Vorgehensweise wurde anhand konkreter Beispiele aus der pharmazeutischen Industrie erprobt.

### Literatur:

- [1] Donzel, A.; Carmona, J.; Corkan, L.A.: Perspectives on Scheduling. In: High Throughput Screening (J.P. Devlin, Ed.). pp 525–544. Marcel Dekker Inc., New York, 1997.
- [2] Ierapetritou, M.G.; Floudas, C.A.: Effective Continuous-Time Formulation for Short-Term Scheduling, 1. Multipurpose Batch Processes. *Ind. Eng. Chem. Res.* (1998) 37, 4341–4359.
- [3] Löhl, T.; Schulz, C.; Engell, S.: Sequencing of Batch Operations for a Highly Coupled Production Process: Genetic Algorithms Versus Mathematical Programming. *Computers and Chemical Engineering* (1998), 22 Suppl., 579–585.
- [4] Murray, C.; Anderson, C.: Scheduling Software for High-Throughput Screening, *Laboratory Robotics & Automation* (1996) 8(5), 295–305.
- [5] Schilling, G; Pantelides, C.C.: Optimal periodic scheduling of multipurpose plants. *Computers and Chemical Engineering* (1999), 23, 635–655.
- [6] CPLEX: <http://www.ilog.com/products/cplex>.

# Evolutionäre Optimierung von graphischen Bedienoberflächen zur Führung technischer Prozesse

Dipl.-Ing. Andreas Völkel

Fachgebiet Systemtechnik und Mensch-Maschine-Systeme,  
Institut für Meß- und Automatisierungstechnik IMAT  
Universität Kassel

Mönchebergstraße 7, 34109 Kassel

Tel.: 0561/804-2701

Fax: 0561/804-3542

Email: [a.voelkel@uni-kassel.de](mailto:a.voelkel@uni-kassel.de)

**Schlüsselwörter:** Evolutionäre Optimierung, Graphische Bedienoberflächen, Prozessvisualisierung

Die aktuellen Entwicklungen industrieller Anlagen haben zu einer erhöhten Komplexität der in ihnen ablaufenden Prozesse und damit zu gestiegenen Anforderungen an die Bediener geführt. Der Verantwortungsbereich der Bediener hat sich gleichzeitig vom Führen der Anlagen hin zu Beobachtungsaufgaben verschoben. Begründet wird dies durch die immer leistungsfähiger und preiswerter werdenden Automatisierungseinrichtungen mit der Folge erhöhter Automatisierungsgrade. Aufgrund der Tatsache, daß die Anzahl der für die Führung eines Prozesses zuständigen Bediener immer weiter abnimmt, steigt die für einen einzelnen Bediener zu überwachende Information an [1]. Aus dem erhöhten Automatisierungsgrad ergibt sich zudem der Verlust manueller Fertigkeiten der Prozessführung, während die Verantwortungsbereiche für die Bediener anwachsen [2][3]. Aus den geschilderten Zusammenhängen läßt sich die Forderung formulieren, die Kommunikation zwischen Mensch und Maschine für den Menschen möglichst verständlich und transparent zu gestalten[4]. Die Maschine sollte den Kommunikationsbedürfnissen des Menschen angepaßt werden, und nicht umgekehrt. Eine adäquate Gestaltung der Schnittstelle zwischen Mensch und Maschine, also jener Systeme, die für die Informationsübermittlung in beiden Richtungen sorgen, kann die angestrebte Anpassung leisten.

Der erste Schritt in der Optimierung der graphischen Bedienoberflächen ist die Anpassung der Informationsdarstellung an die Bedürfnisse des Menschen. Dazu werden dem Bediener neben dem Industrie-Standard der topologischen Darstellung drei weitere Oberflächen zur Verfügung gestellt. Dazu zählen die quasi photorealische virtuelle 3D-Sicht auf den Prozess nach Wittenberg [5], die auf dem Verhalten basierende Sicht des Ecological Interface Designs (EID) von Vicente [6] und die funktionsorientierte Sicht des Multilevel Flow Modeling (MFM) von Lind [7].

Im zweiten Schritt paßt sich die Informationsdarstellung durch die Anwendung evolutionärer Algorithmen an die Bedürfnisse eines individuellen Bediener an. Die natürliche Evolution stellt hier das Vorbild für diese Art der Optimierung [8] dar. Evolutionäre Algorithmen sind stochastische Suchverfahren, die auf Populationen von Individuen arbeiten [9]. Auf die Individuen wird das Prinzip „*Der Stärkere überlebt!*“ angewendet, um so im Hinblick auf eine Zielfunktion immer bessere Individuen zu erzeugen. Hervorgegangen sind die evolutionären Algorithmen aus drei parallel aufgetretenen Richtungen: der evolutionären Programmierung ([10]), den Evolutionsstrategien ([11]) und den genetischen Algorithmen ([12] [13]). Alle

drei Denkweisen abstrahieren die bislang nur im biologischen Kontext untersuchten Evolutionsprozesse – Selektion (Auswahl von Individuen [14][15]), Rekombination (Bildung von Nachkommen [16]), Mutation (Verändern der Nachkommen [17]) und die Reinsertation (Wiedereinfügen der Nachkommen in die Population [18]) – und machen sie für die technische Optimierung nutzbar. Der Begriff der evolutionären Algorithmen scheint weitgehend als Oberbegriff akzeptiert. Heute ist diese Art der Optimierung weit verbreitet. Sie findet in allen Bereichen der Ingenieurwissenschaften Anwendung, aber auch in vielen anderen Gebieten (siehe z.B. [19], [20] und [21]).

Im konkreten Fall kann der Bediener aus den vier genannten graphischen Oberflächen die Objekte auswählen, die ihn bei der Prozessführung am besten unterstützen. Über die evolutionäre Optimierung werden diese Objekte in einer gemeinsamen Oberfläche zusammengefaßt und bilden so die individuell günstigste Visualisierung. Die Objekte bzw. Individuen „kämpfen“ um die Aufnahme in die neu zu generierende Oberfläche. Die Entscheidung, welche Individuen „überleben“ und welche nicht, resultiert aus der Interaktion des Bediener mit der graphischen Bedienoberfläche

und aus deren Bewertungen durch die Bediener. Zur Interaktion zählen die Handlungen, die ein Bediener mit der Oberfläche ausführt und die Einstellungen durch den Bedie-

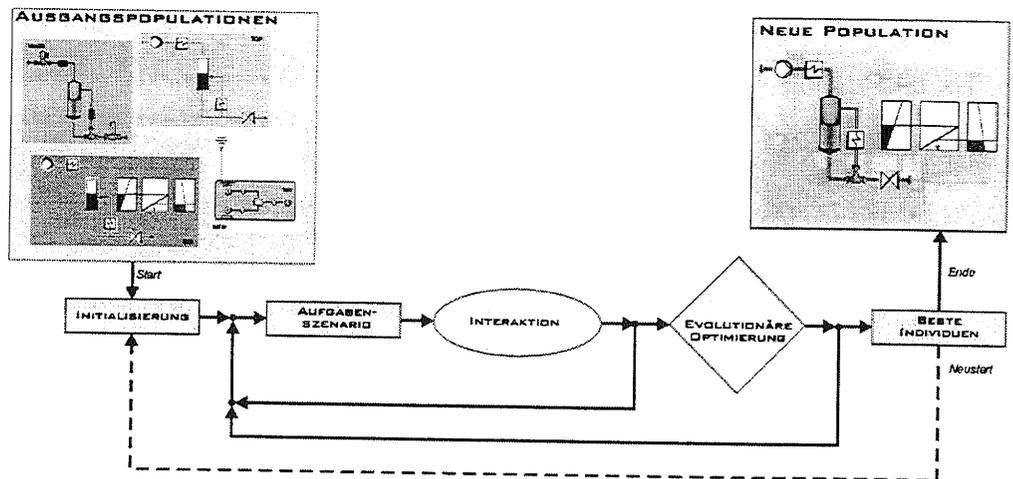


Abbildung 1: Struktur der Optimierung

ner. Zu den Bewertungen zählen die mittels eines Fragebogens erfaßten subjektiven Eindrücke des Bediener von den jeweiligen Oberflächen. Verschiedene Aufgabenszenarien sind zu durchlaufen, währenddessen der Bediener verschiedene Situationen bewältigen muss. Die Interaktion des Bediener mit der Oberfläche wird erfaßt und in die evolutionären Optimierung eingebunden. Dieser Vorgang wird solange durchlaufen, bis ein Abbruchkriterium erfüllt ist. Tritt dieser Fall ein, sind die besten Individuen erreicht und die Optimierung ist abgeschlossen. [22]

## Literatur:

- [1] H.G. Thierfelder "Mit neuester Technik bestehende Kraftwerke modernisieren", *ABB Technik*, Nr. 2, S.15-24, 1997.
- [2] L. Bainbridge, „Ironies of Automation“, *Automatica*, Vol. 19, Nr. 6, S. 775-779, 1983.
- [3] A. Völkel, „Experimentelle Untersuchung kognitionsbezogener Prozessvisualisierungen in Ziel-Mittel-orientierten Mensch-Maschine-Schnittstellen – Ergebnisse“, Interner Bericht IMAT-MMS18 ISSN 0940-094X, Fachgebiet Systemtechnik und Mensch-Maschine-Systeme, Institut für Meß- und Automatisierungstechnik (IMAT), Universität Kassel}, 2001.
- [4] G. Johannsen , *Mensch-Maschine-Systeme*, Springer-Verlag, Berlin u.a., 1993.

- [5] C. Wittenberg, *Virtuelle Prozessvisualisierung*, Dissertation, Universität Kassel, Institut für Meß- und Automatisierungstechnik (IMAT), Fachgebiet Systemtechnik und Mensch-Maschine-Systeme, 2000.
- [6] K.J. Vicente und J. Rasmussen, „The ecology of human-machine systems {II}: mediating direct perception in complex work domains“, *Ecological Psychology*, Vol. 2, Nr. 3, S. 207-249, 1990.
- [7] M. Lind, „Representing goals and functions of complex systems: An introduction to Multilevel-Flow-Modeling“, Technischer Bericht 90-D-381 ISBN 87-87950-52-9, Institute of Automatic Control Systems, Technical University of Denmark, 1990.
- [8] H.-P. Schwefel, Evolutionäres Rechnen in der Computational Intelligence. In: *Computational Intelligence: Neuronale Netze, evolutionäre Algorithmen, Fuzzy Control im industriellen Einsatz*, VDI-Berichte (S. Hafner, H.Kiendl und H.-P. Schwefel, Hrsg). VDI-Verlag, Düsseldorf, VDI-VDE-GMA-Fachtagung 3.-4.~März 1998, Vol. 1381, S. 19-23, ISBN 3-18-091381-9, 1998.
- [9] T. Bäck, U. Hammel und H.-P. Schwefel, Modelloptimierung mit evolutionären Algorithmen. In: *Fortschritte in der Simulationstechnik, Band 6* {A. Sydow, Hrsg.}. Vieweg-Verlag, 8. Symposium Simulationstechnik der Arbeitsgemeinschaft Simulation (ASIM), S. 49-57, 1993.
- [10] L.J. Fogel, A.J.b Owens und M.J. Walsh, *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*. John Wiley, New York, 1966.
- [11] I. Rechenberg, *Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*, Frommann-Holzboog-Verlag, Stuttgart, 1994.
- [12] J.D. Bagley, *The Behavior of Adaptive Systems which employ Genetic and Correlation Algorithms*, Dissertation, Nr. 28(12)5106B, University of Michigan, 1967.
- [13] J.H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [14] G. Bell, *Selection – The Mechanism of Evolution*, Chapman & Hall, New York u.a., 1996.
- [15] H. Mühlenbein und D. Schlierkamp-Voosen, Analysis of selection, mutation and recombination in genetic algorithms. In: *Lecture Notes in Computer Science - Evolution and Biocomputation - Computational Models of Evolution*, (W. Banzhaf, W. Eckman und H. Frank, Hrsg.). Springer-Verlag, Berlin, S.142-168, 1995.
- [16] W.M. Spears, *Evolutionary Algorithms : The Role of Mutation and Recombination*, Springer-Verlag, Berlin u.a., 2000.
- [17] W.E. Lönning, Mutationen: Das Gesetz zur rekurrenten Variation. In: *Streitfall Evolution - Kontroverse Beiträge zum Neodarwinismus*, (J. Mey, R. Schmitd und S. Zibulla, Hrsg.), S Hirzel - Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, Stuttgart, S.149-166, 1995.
- [18] H. Pohlheim, *Entwicklung und systemtechnische Anwendung Evolutionärer Algorithmen*, Dissertation, Technische Universität Ilmenau, 1998.
- [19] T. Riechmann, *Genetic Algorithms and Economic Evolution*, Universität Hannover, Hannover, 1998,
- [20] W. Ebeling und R. Feister, *Chaos und Kosmos: Prinzipien der Evolution*, Spektrum Akademie Verlag, Heidelberg u.a, 1994.
- [21] A. Skusa, „Künstliche Chemie“, *Künstliche Intelligenz* Nr. 1, S.12-19, 2000.
- [22] A. Völkel, Cognition Related Process Visualization with MFM and EID: Improvement or not?. In: *8th IFAC/IFIP/IFORS/IEA Symposium on Analysis, Design, and Evaluation of Human-Machine Systems*, Kassel, Germany, 18-20 September, 2001.