

40. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD  
22.-24. FEBRUAR 2006

## Programm und Kurzfassungen

### Mittwoch, 22. Februar 2006

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

### Donnerstag, 23. Februar 2006

08:45 – 09:00 **Eröffnung und Begrüßung (Raum 1)**  
*Prof. Dr. K. Schlacher, Universität Linz*

	Raum 1	S.	Raum 2	S.
<b>09:00 – 10:30</b>	<b>Fahrzeuge</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. F. Svaricek		<b>Trajektorienplanung</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Dr.rer.nat. K. Reinschke	
09:00 – 09:30	Das Fahrerassistenzsystem PRORETA zur Unfallvermeidung <i>M. Schorn (Institut für Automatisierungstechnik, TU Darmstadt, Isermann, Gr. 7)</i>	1	Ein neuer Ansatz zur robusten Trajektorienplanung und robusten nichtlinearen modellprädiktiven Regelung für Prozesse mit Parameterunsicherheiten <i>T. Heine (FG Mess- und Regelungstechnik, TU Berlin, King, Gr. 2)</i>	6
09:30 – 10:00	Fehlertolerantes Monitoring von Fahrzeugquerdynamik-Regelungssystemen <i>S. Schneider (FG Automatisierungstechnik und komplexe Systeme, Universität Duisburg-Essen, Ding, Gr. 11)</i>	3	Entwurf von nichtlinearen Vorsteuerungen für einen Arbeitspunktwechsel <i>K. Graichen (Institut für Systemdynamik, Universität Stuttgart, Zeitz, Gr. 27)</i>	8
10:00 – 10:30	Diagnose und Regelung des Verbrennungsmotors anhand der hochaufgelösten Kurbelwellenwinkelgeschwindigkeit <i>Ch. Schütz (Fraunhofer-Institut für Informationsverarbeitung, Karlsruhe, Beyerer, Gr. 18)</i>	4	Ein Beitrag zur Entwicklung von Strategien zur Missions- und/oder Manöverführung mobiler Systeme in Schwärmen <i>T. Glotzbach (Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik, TU Ilmenau, Wernstedt, Gr. 15)</i>	10

10:30 – 11:00 **Kaffee-/Teepause**

# 40. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD

22.-24. FEBRUAR 2006

<b>11:00 – 12:30 Prozess- und Anlagentechnik</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr. A. Kugi		<b>Theorie</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. M. Zeitz		
11:00 – 11:30	Qualitätsregelung für die Gasabschreckung von Stahlbauteilen <i>M. Dijkman (FG Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik, Universität Bremen, Goch, Gr.5)</i>	<b>12</b>	Steuerung und Regelung von mehrvariablen LTI-Regelstrecken in polynomialer Darstellung <i>S.-O. Lindert (Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie, TU Dresden, Reinschke, Gr. 9)</i>	<b>18</b>
11:30 – 12:00	Eine neue Methode zur Quellenlokalisierung auf der Basis räumlich verteilter, punktwiser Konzentrationsmessungen <i>J. Matthes (Institut für Angewandte Informatik, Forschungszentrum Karlsruhe, Bretthauer, Gr. 16)</i>	<b>14</b>	Reglerentwurf für polynomiale Systeme mittels Dissipativität und der Summe-von-Quadraten Zerlegung <i>Ch. Ebenbauer (Institut für Systemtheorie und Regelungstechnik, Universität Stuttgart, Allgöwer, Gr. 26)</i>	<b>20</b>
12:00 – 12:30	Modellierung und Regelung beim Antrieb und Wickeln von elastischen Stoffbahnen: Überblick und neue Herausforderungen <i>D. Knittel (ERT Enroulement, Université Louis Pasteur, Strasbourg, Knittel, Gr. 24)</i>	<b>16</b>	Modellierung und Regelung von piezoelektrischen Balken <i>H. Ennsbrunner (Institut für Regelungstechnik u. Prozessautomatisierung, Universität Linz, Schlacher, Gr. 12)</i>	<b>22</b>

## 12:30 – 15:00 Mittagessen / Pause

<b>15:00 - 16:00 Medizin</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. V. Krebs		<b>Neuronale- und Petrinetze</b> Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. D. Abel		
15:00 – 15:30	Protektive Beatmung – Automatisierungstechnik als Schlüsseltechnologie <i>H. Lüpschen (Philips Lehrstuhl für Medizinische Informationstechnik, RWTH Aachen, Leonhardt, Gr. 1)</i>	<b>24</b>	Dynamische Identifikation mit Neuro-Fuzzy Netzen <i>S. Jakubek (Institut f. Mechanik und Mechatronik, Wien, Jörgl, Gr. 28)</i>	<b>30</b>
15:30 – 16:00	Neue Ansätze zur Rehabilitation gelähmter Menschen mittels geregelter Funktioneller Elektrischer Stimulation (FES) <i>T. Schauer (Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme, Magdeburg, Raisch, Gr. 20)</i>	<b>26</b>	Modellbasierte Diagnose auf der Basis von Dualität in Petrinetzen – eine Machbarkeitsstudie im Bereich Motorsteuerung <i>J. Müller (Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik, TU Braunschweig, Schnieder, Gr. 4)</i>	<b>32</b>

## 16:00 – 16:30 Kaffee-/Teepause

<b>16:30 – 18:00 Plenarvortrag</b>	
Polynomial Control: Past, Present and Future <i>Vladimir Kucera, Czech Technical University Prague; Past President IFAC; Fellow IEEE, IEE; Vice President of the Engineering Academy of the Czech Republic</i>	

## 18:30 Abendessen

# 40. REGELUNGSTECHNISCHES KOLLOQUIUM IN BOPPARD

22.-24. FEBRUAR 2006

## Freitag, 24. Februar 2006

<b>08:30 – 10:00</b>		<b>Roboter</b>	<b>Diskrete Systeme</b>	
		Sitzungsleitung: Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. H.P. Jörgl	Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. O. Sawodny	
08:30– 09:00	Bildgestützte Navigation von mobilen Robotern mit einem omnidirektionalen Kamerasystem <i>F. Hoffmann (Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik, Universität Dortmund, Bertram, Gr. 8)</i>	<b>36</b>	Ereignisdiskrete Diagnose verteilter Systeme <i>J. Neidig (Lehrstuhl Automatisierungstechnik und Prozessinformatik, Ruhr-Universität Bochum, Lunze, Gr. 3)</i>	<b>42</b>
09:00 – 9:30	Optimale Pfadplanung aus fusionierten Videomerkmalen <i>C. Duchow (Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe, Stiller, Gr. 17)</i>	<b>38</b>	Hybride Regelung durch qualitative Vorselektion <i>W. Kleissl (Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik, TU Graz, Dourdoumas, Gr. 12)</i>	<b>44</b>
09:30 – 10:00	Ausgewählte Regelungsverfahren für humanoide Laufroboter <i>D. Wollherr (Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik, TU München, Buss, Gr. 21)</i>	<b>40</b>	Eine Prozessführungsstrategie für zeitdiskrete stückweise affine Systeme <i>E. Hodrus (Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme, Universität Karlsruhe, Krebs, Gr. 17)</i>	<b>46</b>

### 10:00 – 10:30 Kaffee-/Teepause

<b>10:30 – 12:00</b>		<b>Software</b>	<b>Kommunikation/Anwendungen</b>	
		Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. J. Lunze	Sitzungsleitung: Prof. Dr.-Ing. M. Buss	
10:30– 11:00	Automatisiertes Engineering von Prozessleitsystemen <i>T. Schmidberger (Institut für Automatisierungstechnik, Universität der Bundeswehr Hamburg, Fay, Gr. 13)</i>	<b>48</b>	Analyse von CRC-Polynomen für die sicherheitskritische Kommunikation mittels deterministischer und stochastischer Automaten <i>F. Schiller (Lehrstuhl für Informationstechnik im Maschinenwesen, TU München, Schiller, Gr. 18)</i>	<b>54</b>
11:00 – 11:30	Qualitätssicherung von Lernsystemen in der Systemtechnik-Lehre <i>I. Wagner (IMAT – FG Systemtechnik und Mensch-Maschine Systeme, Universität Kassel, Johannsen, Gr. 19)</i>	<b>50</b>	Regelung Dynamischer Systeme mit stochastischer Zeitverzögerung durch ein Kommunikationsnetzwerk <i>O.-J. Rösch (Institut für Regelungs- und Steuerungstechnik, Universität Siegen, Roth, Gr. 25)</i>	<b>55</b>
11:30 – 12:00	Testdatenermittlung für eingebettete Automatisierungssoftware auf Grundlage hybrider Modelle <i>P. Linder (Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik, Universität Stuttgart, Göhner, Gr. 26)</i>	<b>52</b>	Optimierung von Aktuatorik und Flugregelung für künftige Verkehrsflugzeuge mit voll-elektrischer Energieversorgung <i>C. Schallert (Abteilung Entwurfsorientierte Regelungstechnik, Deutsches Zentrum f. Luft- und Raumfahrt e.V. Oberpfaffenhofen, Bals, Gr. 30)</i>	<b>56</b>

**12:00 – 12:30 Abschluss / Preisverleihung / Aufruf für Boppard 2007**

**12:30 – 13:30 Mittagessen**

**13:30 Ende des Kolloquiums**

# Das Fahrerassistenzsystem PROETA zur Unfallvermeidung

Matthias Schorn \*

\* Institut für Automatisierungstechnik  
Fachgebiet Regelungstechnik und Prozess-  
automatisierung  
Technische Universität Darmstadt  
Landgraf-Georg-Str. 4  
06151 – 16 74 04  
06151 – 16 74 21  
[MSchorn@iat.tu-darmstadt.de](mailto:MSchorn@iat.tu-darmstadt.de)

Ulrich Stählin \*\*

\*\* Institut für Automatisierungstechnik  
Fachgebiet Regelungstechnik und Prozess-  
automatisierung  
Technische Universität Darmstadt  
Landgraf-Georg-Str. 4  
06151 – 16 74 04  
06151 – 16 74 21  
[UStaehlin@iat.tu-darmstadt.de](mailto:UStaehlin@iat.tu-darmstadt.de)

**Schlüsselwörter:** Fahrerassistenz, Unfallvermeidung, autonome Eingriffe, Zustandsschätzung

Im Rahmen eines interdisziplinären Forschungsprojekts in Zusammenarbeit mit Continental Teves wird an der TU Darmstadt ein Fahrerassistenzsystem zur Unfallvermeidung entwickelt. Hierbei arbeiten das Institut für Automatisierungstechnik, das Fachgebiet Fahrzeugtechnik und das Institut für Arbeitswissenschaft zusammen.

Ziel des Systems ist es, drohende Kollisionen zu erkennen und falls notwendig im physikalischen letztmöglichen Moment zu verhindern. Hierbei wird der Fahrer im Regelkreis berücksichtigt. Zur Erkennung des Umfelds wird ein Laserscanner und eine Video-Kamera verwendet, wobei ausschließlich seriennahe Sensoren verwendet werden, um die Nähe zu einer späteren Realisierung zu gewährleisten. Für automatische Eingriffe stehen eine elektrohydraulische Bremsanlage und eine Überlagerungslenkung zur Verfügung. Um Erkenntnisse über Reaktionen von verschiedenen Fahrern auf plötzlich auftauchende Hindernisse und auf automatische Brems- und Lenkeingriffe zu erhalten, wurden Versuche mit Probanden durchgeführt.

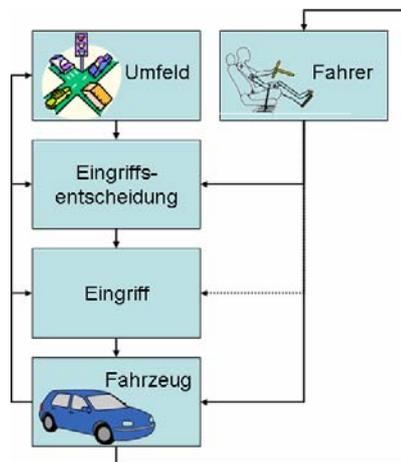


Abbildung 1: Teilsysteme des Fahrerassistenzsystems PROETA

Im Laufe des Vortrags wird auf folgende Lösungen eingegangen:

**Vorgabe einer Ausweichbahn:** Ausweichvorgänge haben in der Regel die Form eines liegenden S. Eine Funktion aus dieser Gruppe der so genannten sigmoidalen Funktionen dient als Ansatz für die hier vorgestellte Bahnvorgabe. Über ein stark vereinfachtes Fahrzeugmodell lässt sich eine direkte Beziehung zwischen der Bahnkurve  $y(x)$  und der Querbewegung herstellen. Durch Beschränkung der maximal erlaubten Querbewegung und des maximal möglichen Rucks ergeben sich die Parameter der Ausweichbahn für einen notwendigen Querversatz.

Abbildung 1 zeigt die Aufteilung des Gesamtsystems:

- Umfeld: Sensorik für Umfeld, Rohdatenverarbeitung, Fusion der Daten der unterschiedlichen Sensoren [1]
- Eingriffsentscheidung: Prädiktion der Bewegungen von eigenem Fahrzeug und Hindernissen, Planung eines Eingriffs, Auswahl eines Eingriffs
- Eingriff: Steuerung / Regelung der Lenk- und Bremsingriffe
- Fahrzeug: Aktorik, Sensorik für Fahrzustand, Fahrzustandsschätzung
- Fahrer: Probandenversuche, Integration des Fahrers in das Gesamtsystem, Rückgabe des Fahrzeugs an den Fahrer

**Schätzung nicht direkt messbarer Zustände:** Schätzalgorithmen basierend auf klassischen linearen bzw. nichtlinearen Beobachtern als auch auf einem Kalman-Filter werden verwendet. Ein Kalman-Filter, das unter anderem den Schwimmwinkel schätzt, wird vorgestellt. Der Schwimmwinkel wird als Zustandsgröße beim Entwurf mehrerer Regelungsvarianten für die Bahnregelung verwendet. Die Geschwindigkeit des Fahrzeugschwerpunktes und der Kraftschlussbeiwert werden mit anderen Verfahren geschätzt.

**Brems- und Lenkeingriffe:** Situationsabhängig kann das Fahrerassistenzsystem unterschiedliche Eingriffe durchführen: Bremsingriffe [2], Lenkeingriffe sowie eine Kombination aus Brems- und Lenkeingriffen. Die ersten beiden Varianten sind bereits erprobt, die dritte Variante befindet sich zur Zeit noch in der Entwicklung. Für reine Lenkeingriffe wurden mehrere Regelungsvarianten implementiert, wie beispielsweise ein nichtlinearer Folgeregler, ein Regelungsansatz ähnlich dem von Lammen [3], ein flachheitsbasierter Regelungsansatz [4] sowie ein prädiktiver Regelungsansatz.

Nach Fertigstellung der Teilsysteme und Erprobung mit einem komplexen Fahrzeugmodell [2] sowie mit einem realen Versuchsfahrzeug (Abbildungen 2 und 3) erfolgt die Zusammenführung zu einem Gesamtsystem. Von ausschlaggebender Bedeutung ist die Wahl der Schnittstellen, die ebenfalls kurz vorgestellt werden. Ergebnis des Projekts ist ein Fahrzeug, das im Falle drohender Kollisionen Notbrems- und Notlenkeingriffe durchführt, sofern der Fahrer nicht selbst reagiert.



Abbildung 2: Versuchsfahrzeug mit Sensorik für das Fahrzeugumfeld



Abbildung 3: Signalverarbeitung und Rechner im Versuchsfahrzeug

## Literatur:

- [1] Darms, M. , Winner, H.: Fusion von Umfelddaten für Fahrerassistenzsysteme. In Stiller, C.; Maurer, M.: Workshop Fahrerassistenzsysteme FAS2003, Seiten 13-16, Freundeskreis Mess- und Regelungstechnik Karlsruhe e.V., Karlsruhe, 2003
- [2] Schorn, M. , Schmitt, J. , Stählin, U. , Isermann, R.: Model-based braking control with support by active steering, Proceedings of 16th IFAC World Congress, Prague, Czech Republic, 2005
- [3] Lammen, B.: Automatische Kollisionsvermeidung für Kraftfahrzeuge, Dissertation an der Fakultät für Elektrotechnik der Universität Dortmund, 1993
- [4] Rothfuß, R. , Rudolph, J. , Zeitz, M.: Flachheit: Ein neuer Zugang zur Steuerung und Regelung nichtlinearer Systeme, at - Automatisierungstechnik 45, S. 517-525, 1997
- [5] Lages, U.: Untersuchungen zur aktiven Unfallvermeidung von Kraftfahrzeugen, VDI Verlag Düsseldorf, Fortschritt-Bericht Reihe 12 Nr. 446, 2001
- [6] Mildner, F.: Untersuchungen zur Erkennung und Vermeidung von Unfällen für Kraftfahrzeuge, Dissertation am Fachbereich Maschinenbau an der Helmut-Schmidt-Universität/Universität der Bundeswehr Hamburg, 2004

# Fehlertolerantes Monitoring von Fahrzeugquerdynamik-Regelungssystemen

Stefan Schneider

Automatisierungstechnik und komplexe Systeme  
Universität Duisburg-Essen  
Bismarckstr. 81, BB517  
Tel. 0203 379 3387  
Fax 0203 379 2928  
Email: stefan.schneider@uni-duisburg.de

Steven X. Ding

Automatisierungstechnik und komplexe Systeme  
Universität Duisburg-Essen  
Bismarckstr. 81, BB511  
Tel. 0203 379 3386  
Fax 0203 379 2928  
Email: s.x.ding@uni-duisburg.de

**Schlüsselwörter:** fehlertolerante Überwachung, modellgestützte Fehlerdiagnose, Regelsysteme in Fahrzeugen, Vertrauensintervalle

Eine stark anwachsende serienmäßige Integration von elektronischen Regelungssystemen wie ABS (Antiblockiersystem), ESP (Elektronisches Stabilitäts-Programm), TCS (Traktionskontrolle) und (ROSE) Roll-Over Sensierung in Kraftfahrzeuge prägen die heutige Entwicklung in der Automobilindustrie. Zentrale Funktion dieser Regelungssysteme ist die Erhöhung der Sicherheit durch Stabilisierung des Fahrzeuges in kritischen Situationen durch aktive Eingriffe in Brems- und Antriebssysteme sowie zukünftig in das Lenksystem.

In diesem Beitrag werden Entwicklungen im Bereich der fehlertoleranten modellgestützten Überwachung als auch der Schätzung von Zustands- und Ausgangsgrößen aus dem EU-Projekt *Intelligent Fault Tolerant Control in Integrated Systems (IFATIS)* vorgestellt. Ziele des Projektes sind unter anderem die Entwicklung von Verfahren zur Generierung zuverlässiger fehlertoleranter Schätzungen der Kenngrößen der Fahrzeugquerdynamik und zur automatischen, zuverlässigen Detektion und Isolation von Fehlern der Sensorik. Die entwickelten Verfahren sollen eine modulare und skalierbare Struktur aufweisen und für die Implementierung in Steuergeräte geeignet sein.

Ein zentrales Problem bei der Entwicklung modellgestützter Methoden ist die Abhängigkeit dieser von der Qualität und Genauigkeit des verwendeten Systemmodells. Im Bezug auf das hier verwendete Modell der Fahrzeugquerdynamik ergeben sich hinsichtlich dieser Parameter zwei Faktoren die zu erheblichen Ungenauigkeiten führen. Bei dem verwendeten Fahrzeugmodell (Einspurmodell) handelt es sich um ein stark vereinfachtes Modell mit einer Vielzahl vereinfachender Annahmen die im Fahrbetrieb teilweise nicht erfüllt werden. Des Weiteren können Straßenbedingungen und spezielle Fahrmanöver zu starken Parameterschwankungen führen. Die oben aufgeführten Situationen treten jedoch, wie sich aus statistischen Daten ergibt, in weniger als 20% der im normalen Fahrbetrieb möglichen Fahrmanöver auf. Dies liefert zum einen Argumente für eine Verwendung dieses Einspurmodells und zum anderen motiviert diese Tatsache zur Entwicklung alternativer Verfahren zur Berücksichtigung der auftretenden Ungenauigkeiten.

Die Residuengenerierung sowie Zustands- und Ausgangsschätzung basieren auf einer strukturierten Beobachterbank. Zur Realisierung dieser Beobachterbank wird das Einspurmodell mit Hilfe einer Zustandstransformation in eine Form überführt, die eine Adaption des zeitvarianten Parameters Geschwindigkeit erlaubt. Des Weiteren wird zur Strukturierung der Beobachterbank auf die Rückführung je einer Ausgangsgröße verzichtet. Auf diese Weise wird je Beobachter ein Residuum  $R_{n,l}$  generiert welches von einem Fehler

der zu überwachenden Größe abhängig ist. Alle weiteren Residuen  $R_{n,2} \dots R_{n,k}$  (im Falle des Einspurmodells je ein weiteres Residuum) sind unabhängig von diesem Fehler.

Sowohl das Diagnosekonzept als auch das Konzept zur Schätzung von Zustands- und Ausgangsgrößen mit Angabe von Vertrauensintervallen stützen sich auf die Modellierung und Optimierung so genannter Indikatoren. Diese Indikatoren sind proportional zu Änderungen der Residuen, welche durch Modellgenauigkeiten verursacht werden, und zur automatischen Anpassung von Schwellwerten eingesetzt. Zusätzlich werden Vertrauensintervalle für die Schätzungen der Zustände und Ausgangsgrößen aus den gebildeten Indikatoren abgeleitet.

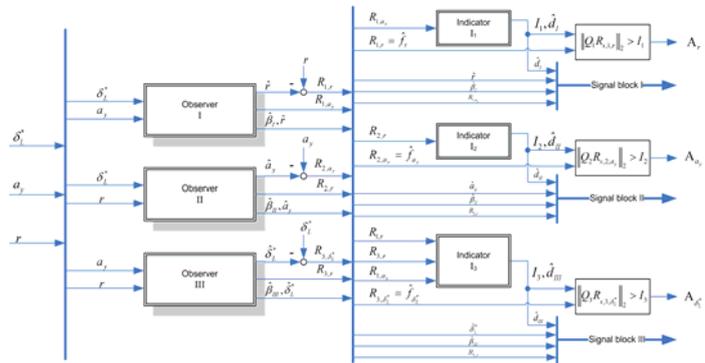


Abbildung 1: Struktur des Diagnosesystems

Bei der Modellierung der Indikatoren wird die oben genannte spezielle Struktur der Beobachter genutzt. Es wird angenommen, dass die generierten Residuen  $R_{n,2} \dots R_{n,k}$  von den gleichen Störungen beeinflusst sind wie das Residuum  $R_{n,1}$ . Diese können daher genutzt werden um einen Indikator für den Einfluss dieser Störungen auf das Residuum  $R_{n,1}$  zu generieren. Zu diesem Zweck werden die Residuen über ein Zeitintervall  $(k-s, k)$ , das basierend auf der Dynamik der angenommenen Störungen gewählt wird, ausgewertet.

## Literatur:

- [1] M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, and M. Staroswiecki, *Diagnosis and Fault-tolerant Control*. Springer, 2003.
- [2] M. Börner, "Adaptive Querdynamikmodelle für Personenkraftfahrzeuge – Fahrzustandserkennung und Sensorfehlertoleranz," Dissertation, 2004.
- [3] M. Börner, L. Andréani, and R. Isermann, "Detection of lateral vehicle driving conditions based on the characteristic velocity," Proc. IFAC world congress 2002, July 21 - 26. Barcelona, Spain: Barcelona, Spain, 2002.
- [4] J. Chen and R. J. Patton, *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*, ser. The Kluwer International Series on Asian Studies in Computer and Information Science. Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [5] E.L. Ding, H. Fennel and S. X. Ding, "Model-based diagnosis of sensor faults for ESP systems", *Control Engineering Practice*, 12, pp. 847-856, 2004.
- [6] S. X. Ding, S. Schneider, E.L. Ding and A. Rehm, "Advanced model-based diagnosis of sensor faults in vehicle dynamics control systems", Proc. IFAC world congress, July, 2005.
- [7] S. X. Ding, S. Schneider, E.L. Ding and A. Rehm, "Fault tolerant monitoring of vehicle lateral dynamics stabilization systems", Akz. für CDC (Joint Conference CDC-ECC), 2005.
- [8] J. J. Gertler, *Fault Detection and Diagnosis in Engineering Systems*. Marcel Dekker Inc., 1998.
- [9] R. Isermann, "Diagnosis methods for electronic controlled vehicles," *Vehicle System Dynamics*, vol. 36, no. 2-3, pp. 77-117, 2001.
- [10] U. Kiencke and L. Nielsen, *Automotive Control Systems*. Springer-Verlag, 2000.

# Diagnose und Regelung des Verbrennungsmotors anhand der hochaufgelösten Kurbelwellen- winkelgeschwindigkeit

Christian Schütz

Fraunhofer Institut für Informationsverarbeitung IITB  
Fraunhoferstraße 1, 76131 Karlsruhe  
Tel. ++49 / (0)721 / 6091-225  
Fax ++49 / (0)721 / 6091-413  
Email schuetz@iitb.fraunhofer.de

**Schlüsselwörter:** Signalverarbeitung, Motordiagnose, hochaufgelöste Drehzahl, Euro 5, (teil-)homogene Verbrennung HCCI, minimaler Sensoraufwand

Die Hubkolbenmaschine stellt auch nach mehr als 100 Jahren die Hauptantriebsquelle im Fahrzeug dar [1]. Die aktuellen Umweltprobleme Ressourcenverknappung und Erderwärmung sowie die Feinstaubbelastung bewegen den Gesetzgeber zu immer schärferen Emissionsgrenzwerten, zu deren Einhaltung die Industrie gezwungen ist. Bereits die ab etwa 2010 gültige Abgasnorm „Euro 5“ schreibt bei Dieselfahrzeugen derart niedrige Rohemissionen vor, dass diese nur durch vollkommen neue Brennverfahren eingehalten werden können [2]. Bestehende Anlagen und Motoren müssen regelmäßig, im Idealfall ständig, kontrolliert werden, um Verschlechterungen des Abgasverhaltens entgegenzuwirken.

Sowohl im diagnostischen Einsatz als auch im künftigen Motormanagement wird ein Maximum an Informationsgewinn bei minimalem Sensoraufwand angestrebt. Hier bietet die Auswertung der hochaufgelösten Winkelgeschwindigkeit der Kurbelwelle großes Potenzial [3]. Die Basisinformation „Winkelgeschwindigkeit“ sowie hiervon abgeleitete Größen wie das Wechseldrehmoment lassen sich nutzen zur Beurteilung des Laufverhaltens einzelner Zylinder, z. B. zur Erkennung von Verbrennungsaussetzern oder zur Analyse des Reibverhaltens des Motors im Auslaufversuch.

Die Methoden zur Erfassung, Verarbeitung und Auswertung der Winkelgeschwindigkeit sowie ausgewählte Diagnoseergebnisse werden vorgestellt.

Mit der weitestgehend gleichen Verarbeitungskette kann auch im „closed loop“ der Verbrennungsablauf geregelt werden. Die hierzu notwendigen Merkmale künftiger Brennverfahren, z. B. (teil-)homogene Verbrennung (HCCI), werden mittels konventioneller Sensorik erfasst und durch neue Algorithmen in der Motorsteuerung errechnet. HCCI (homogeneous charge compression ignition) beruht – stark vereinfacht – auf einer Verschmelzung der bekannten dieselmotorischen und ottomotorischen Verbrennung. Die Handhabung des zündfähigen Gemischs erfordert den Übergang von der Motorsteuerung zur Motorregelung.

Auch die zentrale Verbrennungskenngröße „mittlerer indizierter Druck“ ( $p_{mi}$ ) wird bisher mittels aufwändiger, nicht langzeitstabiler Drucksensorik ermittelt. Es wird gezeigt, wie sich ein  $p_{mi}$ -Äquivalent aus der hochaufgelösten Drehzahl gewinnen lässt, welches die Realisierung einer Laufrüheregelung mit geringem Aufwand ermöglicht.

Die Ergebnisse der Bestimmung einer der wesentlichen Eingangsgrößen einer HCCI-Regelung werden kurz vorgestellt.

## Literatur:

[1] Maas, H.; Klier, H.: Kräfte, Momente und deren Ausgleich in der Verbrennungskraftmaschine, Springer-Verlag Wien New York, 1981, ISBN 3-211-81677-1

- [2] Merker, G.; Schwarz, C.; Stiesch, G.; Otto, F.: Verbrennungsmotoren Simulation der Verbrennung und Schadstoffbildung, B. G. Teubner Verlag, 2004, ISBN 3-519-16382-9
- [3] Fehrenbach, H.: Berechnung des Brennraumdruckverlaufes aus der Kurbelwellen-Winkelgeschwindigkeit von Verbrennungsmotoren, Fortschritt-Berichte VDI Reihe 6 Nr. 255, VDI-Verlag, 1991, ISBN 3-18-145506-7

# Ein neuer Ansatz zur robusten Trajektorienplanung und robusten nichtlinearen modellprädiktiven Regelung für Prozesse mit Parameterunsicherheiten

T. Heine M. Kawohl

Fachgebiet Mess- und Regelungstechnik  
Technische Universität Berlin  
Sek. P2-1, Hardenbergstr. 36a, 10623 Berlin  
Tel. 030 / 314 25160 Fax 030 / 314 21129  
Thomas.Heine@TU-Berlin.de

**Schlüsselwörter:** Robuste Prozessführung, Unscented Transformation

Das Ziel bei der Planung von optimalen Prozessverläufen ist die Maximierung der Produktivität. Meist ergeben sich Trajektorien, die nah an den physikalischen und sicherheitsrelevanten Grenzen entlang führen. Aufgrund von Modellunsicherheiten und Störungen weicht der reale Prozessverlauf vom optimalen, vorausberechneten Verlauf ab. Ohne einen regelnden Eingriff wird zum einen die Produktivität variieren, zum anderen kann es beim Überschreiten von sicherheitskritischen Grenzen sogar zum vollständigen Produktionsausfall oder zu Unfällen kommen. Durch die Aufschaltung von leistungsfähigen modellbasierten Regelungsalgorithmen werden die Abweichungen von der optimalen Trajektorie minimiert und der Prozess somit innerhalb der Beschränkungen gehalten.

Im Rahmen der klassischen Prozessplanung und -führung werden die genauen Auswirkungen von nur ungenau bekannten Anfangsbedingungen oder unsicheren Modellparametern auf die geplante Trajektorie nicht berücksichtigt. Robuste Ansätze, die explizit die Unsicherheiten beim Prozessstart und in den Modellparametern in Form von Intervallen, Sensitivitäten oder Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen berücksichtigen, können Schwankungen der Produktivität stark reduzieren. Insbesondere kann mit diesen Verfahren aber auch garantiert werden, dass Auswirkungen der o.g. Unsicherheiten nicht zu Verletzungen sicherheitskritischer Grenzen führen. Bei robusten Ansätzen basiert die Prozessplanung auf einem min-max-Ansatz, der bei maximaler Produktivität minimale Schwankungen erzeugt.

Dieser Beitrag stellt einen neuen robusten Ansatz zur Prozessplanung und -führung, der auf der Unscented Transformation basiert, vor. Die Leistungsfähigkeit dieses Ansatzes wird in einer Simulationsstudie für ein chemisches und ein biologisches Prozessmodell veranschaulicht. Bei dem chemischen Prozessmodell handelt es sich um eine sicherheitskritische, stark exotherme Reaktion. Schon geringe Unsicherheiten in der Systembeschreibung können dazu führen, dass die Reaktion durchgeht. Die robuste Prozessplanung bietet hier die Möglichkeit einen dynamischen Sicherheitsabstand zu den Grenzen einzuhalten und somit gegenüber den klassischen Verfahren ein erhöhtes Maß an Sicherheit zu gewährleisten. Das biologische Prozessmodell betrachtet vereinfacht die Produktion eines Sekundärmetaboliten. Schon geringe Schwankungen in den Startbedingungen und geringe Modellfehler führen zu starken, üblicherweise negativen Auswirkungen auf die Produktivität. Hier liegt das primäre Ziel der robusten Planungsverfahren in der Bestimmung von Trajektorien, bei denen die Schwankungen der Produktivität klein sind.

# Entwurf von nichtlinearen Vorsteuerungen für einen Arbeitspunktwechsel

Knut Graichen

Institut für Systemdynamik  
Universität Stuttgart  
Tel. 0711-685-6568  
Fax 0711-685-6371

E-mail [graichen@isys.uni-stuttgart.de](mailto:graichen@isys.uni-stuttgart.de)

Michael Zeitz

Institut für Systemdynamik  
Universität Stuttgart  
0711-685-6313  
Fax 0711-685-6371

E-mail [zeitze@isys.uni-stuttgart.de](mailto:zeitze@isys.uni-stuttgart.de)

**Schlüsselwörter:** inversionsbasierte Vorsteuerung, Systeminversion, interne Dynamik, Arbeitspunktwechsel, Randwertaufgabe, Trajektorienplanung

Eine in der Praxis häufig vorkommende Aufgabenstellung ist die Realisierung von Arbeitspunktwechseln in einem vorgegebenen Zeitintervall, wie diese z.B. bei Anfahrvorgängen und Lastwechseln chemischer Reaktoren vorkommen. Um den Arbeitspunktwechsel mit Hilfe einer nominellen Vorsteuerung zu realisieren, ist die Inversion des betrachteten Streckenmodells notwendig. Die damit zusammenhängenden Probleme der Realisierbarkeit der Vorsteuerung bzw. der Instabilität der internen Dynamik im Fall nichtminimalphasiger Strecken können für flache Systeme rein algebraisch gelöst werden [5].

Falls das betreffende Streckenmodell nicht flach ist, kann das inverse Streckenmodell nur numerisch bestimmt werden. In [1, 6] wird ein neuer Zugang zum Entwurf von inversionsbasierten Vorsteuerungen für lineare und nichtlineare Systeme vorgestellt, wobei der Arbeitspunktwechsel als ein Zweipunkt-Randwertproblem in den Koordinaten der Ein-/Ausgangs-Normalform definiert wird. Damit die Randwertaufgabe der internen Dynamik lösbar ist, muss die Solltrajektorie für den Ausgang eine hinreichende Anzahl von freien Parametern enthalten. Die numerische Lösung der Randwertaufgabe mit unbekannten Parametern kann z.B. mit der Matlab-Funktion `bvp4c` erfolgen. Der vorgestellte Steuerungsentwurf ist gleichermaßen für (nicht-)lineare, (nicht-)minimalphasige und (nicht-)flache Systeme anwendbar. Zusätzlich lassen sich Eingangsbeschränkungen [3] sowie Beschränkungen des Ausgangs und seiner Zeitableitungen [4] direkt in der Formulierung der Randwertaufgabe für den Arbeitspunktwechsel berücksichtigen.

In dem Vortrag wird der Vorsteuerungsentwurf für nichtlineare SISO-Systeme erläutert. Als Beispielanwendung dient das Aufschwingen des Doppelpendels, siehe Abb. 1 und [2]. In Abb. 2 sind zeitdiskrete Momentaufnahmen des Doppelpendels dargestellt, um die Dynamik des Aufschwingmanövers zu illustrieren. Die als Video gezeigten experimentellen Ergebnisse verdeutlichen die Genauigkeit der Vorsteuerung sowie die Robustheit der für die Stabilisierung benötigten Regelung.

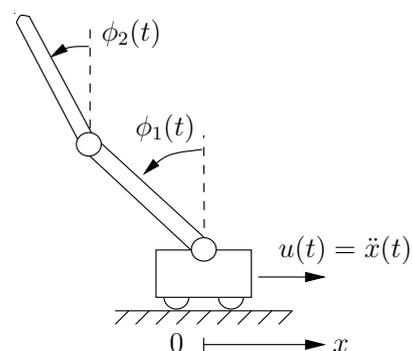


Abb. 1: Doppelpendel mit Winkeln  $\phi_1(t)$ ,  $\phi_2(t)$ , Wagenposition  $x(t)$  und Eingang  $u(t)$ .

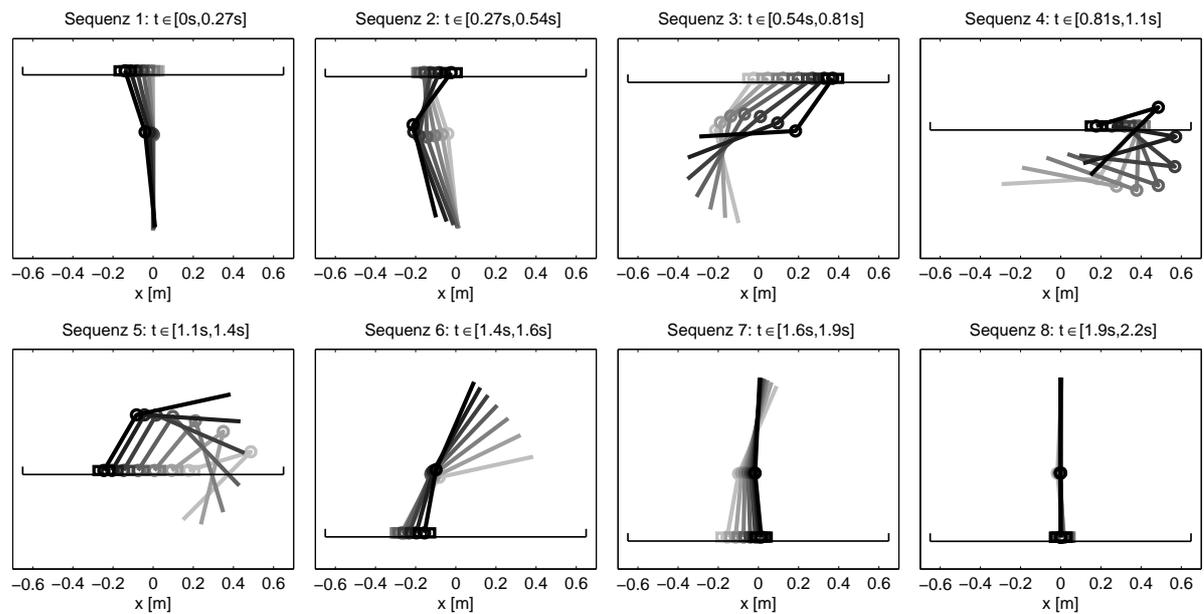


Abb. 2: Zeitdiskrete Momentaufnahmen beim Aufschwingen des Doppelpendels [2].

## Literatur

- [1] K. GRAICHEN, V. HAGENMEYER, M. ZEITZ: A new approach to inversion-based feedforward control design for nonlinear systems. *Automatica*, 41(12):2033–2041, 2005.
- [2] K. Graichen, M. Treuer, M. Zeitz. Swing-up of the double pendulum on a cart by nonlinear feedforward and linear feedback control. *Submitted*, 2005.
- [3] K. GRAICHEN, M. ZEITZ: Feedforward control design for nonlinear systems under input constraints. In T. Meurer, K. Graichen, E.D. Gilles (Editoren): *Control and Observer Design for Nonlinear Finite and Infinite Dimensional Systems*, LNCIS 322, Seiten 235–252, Springer-Verlag, 2005.
- [4] K. Graichen, M. Zeitz. Inversionsbasierter Vorsteuerungsentwurf mit Ein- und Ausgangsbeschränkungen. *Automatisierungstechnik*, 2006.
- [5] V. Hagenmeyer, M. Zeitz. Flachheitsbasierter Entwurf von linearen und nichtlinearen Vorsteuerungen. *Automatisierungstechnik*, 52:3–12, 2004.
- [6] M. Zeitz, K. Graichen, T. Meurer. Vorsteuerung mit Trajektorienplanung als Basis einer Folgeregelung. GMA-Kongress 2005, Baden-Baden, *VDI-Berichte*, Nr. 1883, Seiten 795-806, 2005.

# Ein Beitrag zur Entwicklung von Strategien zur Missions- und / oder Manöverführung mobiler Systeme in Schwärmen

Thomas Glotzbach

Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik  
Technische Universität Ilmenau  
Postfach 10 05 65, 98684 Ilmenau

Fraunhofer Anwendungszentrum Systemtechnik  
des Fraunhofer IITB  
Am Vogelherd 50, 98693 Ilmenau

Tel. +49 (36 77) 69 14 16

Fax +49 (36 77) 69 14 34

Email [thomas.glotzbach@tu-ilmenau.de](mailto:thomas.glotzbach@tu-ilmenau.de)

**Schlüsselwörter:** autonome mobile Systeme, adaptive Autonomie, Roboterschwarm, kooperierendes Verhalten, Autonomiegrad

Im Forschungsgebiet der mobilen Robotik entstehen durch die gegenwärtig aktuellen Aktivitäten in den Bereichen von Autonomie und Schwarmverhalten eine Vielzahl von Problemen und Fragestellungen, welche oft auf den unterschiedlichen Interpretationen des Begriffs „Autonomie“ basieren. Eine fehlende allgemeingültige Definition führt zu einzelfallbezogenen Auslegungen, wodurch Vergleiche und Diskussionen unterschiedlicher Forschungsprojekte erschwert werden. So ist beispielsweise völlig unklar, ob ein mobiles System als autonom bezeichnet werden sollte, welches zu Missionszeiten Informationen von außerhalb (z.B. durch GPS-Nutzung) verwendet. Ebenso unklar ist die Frage, ob Eingriffe von Menschen in die Missionen autonomer Systeme zugelassen werden dürfen, was gerade bei Systemen mit Manipulatoren oder in Einsätzen im Sicherheitsbereich wünschenswert bzw. sogar aus moralischen oder juristischen Gründen notwendig wäre. In Schwärmen mobiler Systeme schließlich steht die gewünschte Kooperation in einem klaren Widerspruch zur oftmals angestrebten Autonomie der einzelnen Objekte. Zur Realisierung von Strategien gerade im Schwarmbereich ist die Entwicklung eines Verständnisses für den Begriff Autonomie nötig, mit welchem die beschriebenen Probleme umgangen und kooperierende Systeme realisiert werden können.

Im Rahmen von verschiedenen Projekten zu mobilen Systemen am Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik der Technischen Universität Ilmenau (z.B. [1], [2], [3]) in Simulation und Realität wurde das Konzept der „Adaptiven Autonomie“ entwickelt. Danach besitzt jedes einzelne System sowie auch ein Schwarm als Ganzes einen eigenen Autonomiegrad, welcher im Einsatz in beliebigen Abstufungen zwischen voll abhängig (ferngesteuert) und vollautonom variieren kann. Die Veränderung wird von einem Adapter vorgenommen, der in Abhängigkeit von Aufgabe und Situation den aktuellen Autonomiegrad festlegt und in der Steuerungssoftware des mobilen Systems bzw. des Schwarmes hinterlegt ist. (*Abbildung 1*).

Durch das vorgeschlagene Konzept sind kooperierende Systeme ohne den zuvor beschriebenen Widerspruch realisierbar: Indem einzelne Systeme ihren Autonomiegrad absenken (sie werden dann als „teilautonom“ bezeichnet), kann der Schwarm als neue, kooperierende Instanz entstehen. Der Schwarm an sich kann wiederum mit hohem Autonomiegrad operieren oder bei Bedarf auf zentrale Rechnerhardware mit Zugang zu globalen Informationen zugreifen. Wenn nötig, kann der Autonomiegrad soweit abgesenkt werden, dass sogar ein Mensch in die Steuerung eingreift. In diesem Fall wird der Mensch ein Teil des vollautonomen Gesamtsystems. (*Abbildung 2*). Anzumerken bleibt dabei, dass im Normalfall die Systeme natürlich ohne Menschen auskommen sollten. Besonders für Menschen eintönige Aufgaben, wie

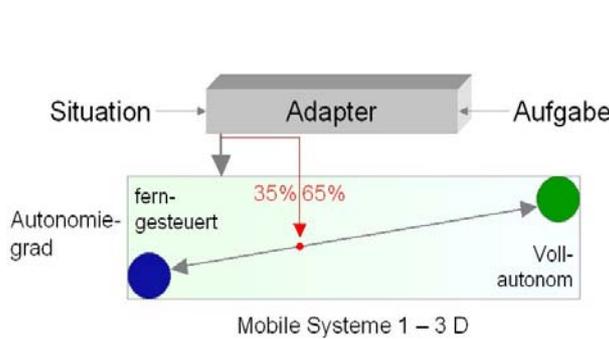


Abbildung 1: Das Konzept der adaptiven Autonomie

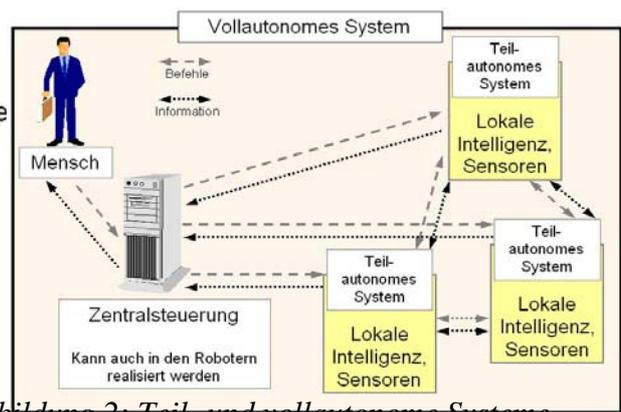


Abbildung 2: Teil- und vollautonome Systeme

z.B. beobachten oder überwachen, soll der Schwarm mit möglichst hohem Autonomiegrad bewältigen. Nur in den schon beschriebenen Situationen mit möglichen schwerwiegenden Folgen ist die Entscheidung des Menschen von den mobilen Systemen einzuholen.

Bei der Entwicklung von Strategien zur Führung von mobilen Schwärmen, welche gegenwärtig eine wichtige Rolle in den internationalen Forschungsaktivitäten einnimmt (z.B. [4]), unter den Aspekten der adaptiven Autonomie spielen die technischen Ausrüstungen der einzelnen Systeme eine wichtige Rolle. Eine aktive Kooperation setzt die Fähigkeit zur ständigen Kommunikation miteinander voraus. Untersuchungen am Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik zeigen, dass jedoch auch Systeme mit geringerem technischen Level ohne direkte Kommunikationsmöglichkeit eine Kooperation ausführen können [5], [6]. Grundlage sind die in der Forschung zu mobilen Systemen (Roboter, Fahrzeuge) oft als Vorlage verwendeten Ameisenalgorithmen. Zur Erfüllung vergleichbarer Missionen ist natürlich eine höhere Systemanzahl nötig, umso geringer deren Equipment ist, wobei der Grad der erreichten Kooperation geringer ausfällt. Paradoxe Weise ist der Autonomielevel des einzelnen mobilen Systems also umso höher, je schlechter der technische Stand des Systems ist.

## Literatur:

- [1] J. Altenburg, T. Glotzbach, J. Wernstedt: Methoden zur Detektion und Vermeidung von Hindernissen in der mobilen Robotik; Symposium „Unmanned Ground Vehicles“ des Bundesamtes für Wehrtechnik und Beschaffung, Mannheim, 10. Dezember 2002
- [2] T. Glotzbach, „Adaptive Autonomy: A suggestion for the definition of the notation ‘Autonomy’ in mobile robotics,“ *IEEE CCA/ISIC/CACSD'04*, Taipeh, Taiwan, 2.-4. September 2004, CD-ROM Proceedings, S. 922-927
- [3] Atlas Elektronik GmbH, TU Ilmenau et al., „GREX: Coordination and control of cooperating heterogeneous unmanned systems in uncertain environments“, Projektantrag für ein EU-Verbundprojekt, „Specific targeted research project IST call 5“, 2005
- [4] R.O. Abel, S. Dasgupta, J.G. Kuhl: Coordinated fault-tolerant control of autonomous agents: geometry and communications architecture; *16<sup>th</sup> IFAC World Congress*, Prag, Tschechische Republik, 3.-8. Juli 2005, CD-ROM Proceedings
- [5] S. Holzapfel, „Missionsmanagement eines großen autonomen Roboterschwarmes durch Evolutionsstrategien,“ Diplomarbeit an der Technischen Universität Ilmenau, 2004
- [6] A. Schröter: „Missionsmanagement von großen autonomen Roboterschwärmen in unterschiedlichen dreidimensionalen virtuellen Realitäten,“ Diplomarbeit an der Technischen Universität Ilmenau, 2005

# Qualitätsregelung für die Gasabschreckung von Stahlbauteilen

M. Dijkman

G. Goch

Fachgebiet Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik  
Universität Bremen

Hochschulring 20, Postfach 33 05 60, 28335 Bremen

Tel.: +49/421/218 5561

Tel.: +49/421/218 5515

Fax: +49/421/218 5625

Fax: +49/421/218 5625

Email: dij@biba.uni-bremen.de

Email: gg@biba.uni-bremen.de

**Schlüsselwörter:** Qualitätsregelung, Gasabschreckung, Verzug

In der Fertigungskette von Stahlbauteilen induziert jeder Prozessschritt (Umformen, Zerspanen, usw.) ein Verzugspotential im Werkstück. Vor allem während der Wärmebehandlung des Bauteils wird ein Großteil dieses Verzugspotentials in Geometrieabweichungen umgewandelt, was zu aufwendigen Nachbearbeitungen führt. Ein wesentliches Ziel des Sonderforschungsbereichs (SFB) 570 ‚Distortion Engineering‘ ist, das über die gesamte Prozesskette hinweg gewonnene Wissen über die Verzugentstehung für eine verzugsoptimale Prozessführung anzuwenden. Dies erfordert den Aufbau von Steuerungen, Rückführungen („Feedbacks“) und Regelkreisen auf ganz unterschiedlichen Ebenen: Auf der *prozessnahen Ebene* sollen für die Wärmebehandlungsprozesse (Erwärmen und Abschrecken) Software- und Hardware-Plattformen in einheitlicher Weise realisiert werden, mit deren Hilfe eine dynamische Steuerung/Regelung zur verzugsgerechten Bearbeitung möglich ist. Auf dieser Basis wird dann eine *maschinennahe Qualitätsregelung* und eine *ebeneninterne Regelung* (zwischen einzelnen Prozessen) entwickelt.

In diesem Beitrag wird die Umsetzung der Qualitätsregelung auf der prozess- und maschinennahen Ebene für die Gasabschreckung dargelegt. Als Strategie für die Qualitätsregelung wird das prozessorientierte Konzept zur Produktionsregelung nach Ament [1], [2] angewendet. Dieses Konzept beschreibt unter anderem, wie ein lernfähiger Post-Prozess-Regler über die Prozessparameter die Werkstückqualität optimiert.

Im SFB 570 kann der Verzug verschiedener Basisgeometrien (Ring, Scheibe und Welle) durch eine asymmetrische Gasabschreckung kompensiert werden [3]. Die Gasdüsenfelder für die drei Bauteilgeometrien sind jeweils aus acht Düsensegmenten aufgebaut, die einzeln über 3/2-Magnetventile pulsierend betrieben werden (siehe Bild 1).

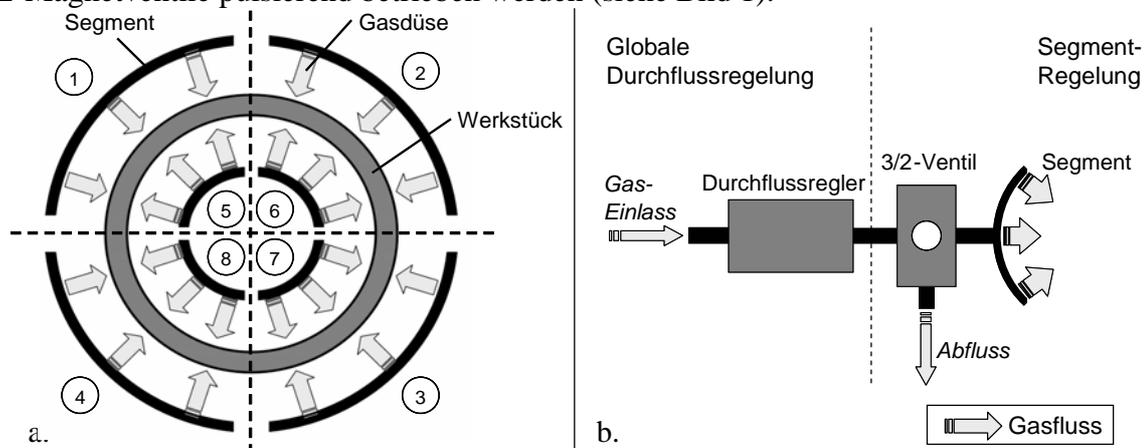


Bild 1: a) Anordnung der Düsensegmente beim Abschrecken eines Ringes; b) Schematische Darstellung der Gasflusssteuerung

In dem Regelungskonzept der Gasabschreckung übernimmt ein Industrie-PC die Echtzeitsteuerung der Düsen (prozessnah). In einer späteren Projektphase ist für die prozessnahe Ebene eine In-Prozess Geometrieerfassung vorgesehen, damit die derzeitige Steuerung auf eine Regelung erweitert werden kann. Die maschinennahe Regelung wird auf einem anderen PC ausgeführt, der dem Industrie-PC übergeordnet ist. Die unterschiedlichen Ebenen der Prozessregelung werden mit einer Software einheitlich gestaltet.

**Prozessnahe Steuerung** – Der Entwurf und die Implementierung der Echtzeitsteuerung erfolgt über MATLAB Simulink und die sogenannte ‚xPC-Target Toolbox‘. Der übergeordnete PC für die maschinennahe Regelung hat in diesem Fall die zusätzliche Funktion eines ‚Host-Rechners‘, der die Entwicklungsumgebung für das ‚Rapid Controller Design‘ der Echtzeitsteuerung umfasst. Nachdem das Steuerungskonzept für die Magnetventile vollständig als Blockschaltbild auf dem Host-Rechner konzipiert ist, wird aus dem Simulink-Modell automatisch ein echtzeitfähiges Programm kompiliert, das auf den Industrie-PC (‚Target-PC‘) übertragen und ausgeführt wird. Während des Echtzeitbetriebs kann über MATLAB weiterhin mit dem Target-PC kommuniziert werden, z.B. um Messdaten zu übertragen oder Prozessparameter zu ändern.

**Maschinennahe Regelung** – Die Strategie für die übergeordnete Qualitätsregelung (siehe Bild 2) besteht aus einem modellbasierten Regler, dem ein Diagnoseschritt vorgeschaltet ist [4]. Das Prozessmodell umfasst ein Neuronales Netz, das anfangs mit Daten aus FEM-Simulationen trainiert wird. Ein Lernalgorithmus aktualisiert das Modell während der Produktion fortlaufend mit realen Prozessdaten. Da die maschinennahe Regelung nicht in Echtzeit, sondern im Takt der Werkstücke läuft, wird diese direkt in MATLAB implementiert. Außerdem ermöglicht diese

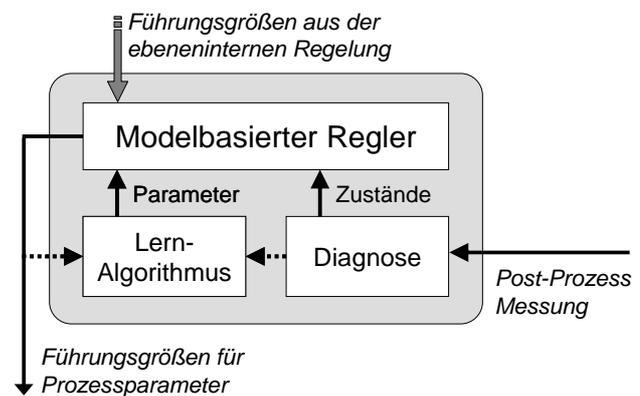


Bild 2: Regelungsstrategie für die maschinennahe Regelung

Konfiguration, die Führungsgrößen aus einer später geplanten ebeneninternen Regelung in die Qualitätsregelung dieses Prozessschrittes einfließen zu lassen.

Zukünftige Arbeiten hinsichtlich der Qualitätsregelung im SFB570 bestehen aus der Erweiterung der In-Prozess-Steuerung auf eine Regelung und dem Aufbau der ebeneninternen Regelung.

## Literatur:

- [1] Ament, C.; Goch, G.: Ein prozessorientiertes Konzept zur Produktionsregelung in der Fertigung. Boppard, 2002.
- [2] Ament, C.; Goch, G.: Qualitätsregelung als Konzept zur dezentralen Steuerung der Fertigung in der Prozesskette. Industrie Management, 19 (2003) 2, S. 9-13.
- [3] Schüttenberg, S.; Frerichs, F.; Hunkel, M.; Fritsching, U.; Mayr, P.: Verzugskompensation mittels Gasabschreckung in flexiblen Düsenfeldern – Teil 1: Prozesstechnik. HTM, Vol. 59, Hanser, München, 2004, pp. 185-191
- [4] Dijkman, M.; Ament, C.; Goch, G.: Design and Application of Quality Control Strategies at the Operational Level of a Production Process Chain. 1st International Conference on Distortion Engineering, Bremen, 2005, S. 375-380.

# Eine neue Methode zur Quellenlokalisierung auf der Basis räumlich verteilter, punktweiser Konzentrationsmessungen

Jörg Matthes \*

\* Institut für Angewandte Informatik  
Forschungszentrum Karlsruhe  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1,  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen  
Tel. 07247 / 825741  
Fax 07247 / 825702  
Email Matthes@iai.fzk.de

Georg Bretthauer \*\*

\*\* Institut für Angewandte Informatik  
Forschungszentrum Karlsruhe  
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1,  
76344 Eggenstein-Leopoldshafen  
Tel. 07247 / 825701  
Fax 07247 / 825702  
Email Georg.Bretthauer@iai.fzk.de

**Schlüsselwörter:** Quellenlokalisierung, Sensornetzwerke, Elektronische Nasen

Zahlreiche Anwendungen in technischen und nichttechnischen Systemen erfordern das Lokalisieren der Emissionsquelle bestimmter Luftbeimengungen. Beispiele hierfür sind die Leckageerkennung in Gefahrenstofflagern oder die Luftqualitätsüberwachung von Deponien.

Die Grundlage einer solchen Quellenlokalisierung bilden räumlich verteilte Online-Konzentrationsmessungen, die beispielsweise durch so genannte Elektronische Nasen ermöglicht werden.

Räumlich verteilte Sensoren liefern aber zunächst nur punktweise Informationen über die Konzentrationsverteilung. Es bedarf spezieller Auswerteverfahren, um aus diesen Messinformationen den Quellort zu bestimmen.

Eine bereits ausführlich untersuchte Gruppe von Verfahren zur Quellenlokalisierung nutzt einzelne Sensoren, die durch mobile Systeme getragen werden. Anhand der gemessenen Konzentrationen wird mit einer Suchstrategie der Ort maximaler Konzentration und damit die Quelle zu bestimmt. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Konzentration in Richtung der Quelle stetig anwächst. [1,2]

Eine andere, bisher wenig untersuchte Gruppe von Verfahren nutzt ein Netzwerk räumlich verteilter, stationärer Sensoren. Im Unterschied zu den Verfahren mit mobilen Sensoren ist hier ein explizites Ausbreitungsmodell für die Quellenlokalisierung notwendig.[3,4]

Dieser Nachteil relativiert sich jedoch in Hinblick auf den praktischen Einsatz im industriellen Umfeld. Dort erweisen sich stationäre Sensoren als wesentlich unproblematischer als mobile Sensoren (z.B. Probleme der Erreichbarkeit bestimmter Anlagenteile durch mobile Systeme).

Ziel der Arbeit ist die Entwicklung neuer zweistufiger Verfahren zur Quellenlokalisierung mit stationären Sensoren auf der Basis eines geometrischen Zugangs. Die neuen Verfahren berücksichtigen die Ausbreitung durch turbulente Diffusion und Advektion.

Die Grundidee des neuen Zugangs ist eine Zerlegung des Quellenlokalisierungsproblems in zwei Schritte. Im ersten Schritt wird für jeden Sensor die Menge aller Punkte bestimmt, auf der sich aus Sicht dieses einzelnen Sensors die Quelle befinden kann. Im zweiten Schritt werden eine Schnittmenge für mehrere Sensoren und damit der Quellort ermittelt.[5,6]

Mit den in der Arbeit entwickelten Algorithmen lässt sich im ersten Schritt für jeden Sensor ein so genannter skalierbarer Sensor-Quell-Abstand sowohl auf der Basis stationärer als auch instationärer Konzentrationen ermitteln. Im zweiten Schritt werden Algorithmen zur Bestimmung des Quellorts auf der Basis der skalierbaren Sensor-Quell-Abstände hergeleitet.

Die Untersuchungen des ungestörten Falls mit minimaler Sensoranzahl zeigen, dass im Fall reiner Diffusion neben dem wahren ein scheinbarer Quellort existiert, der in den Sensoren die gleichen Konzentrationen hervorruft wie die wahre Quelle. Auf der Basis des neuen geometrischen Zugangs wird nachgewiesen, dass beide Lösungen gespiegelte Punkte an der Umkugel der Sensoren sind, die sich nur durch einen zusätzlichen Sensor unterscheiden lassen, der nicht auf dieser Umkugel liegt.

Dies verdeutlicht Abbildung 1 für den Fall einer ebenen Sensor-Quell-Anordnung. Die Punkte gleicher Konzentration für den scheinbaren und den wahren Quellort (Schnittlinie der dargestellten Konzentrationsprofile) liegen auf dem Umkreis der drei Sensoren. Im betrachteten ebenen Fall ist eine Unterscheidung zwischen wahren und scheinbarem Quellort also nur durch einen zusätzlichen Sensor möglich, der sich nicht auf diesem Umkreis befindet.

Im Fall von Diffusion-Advektion ist die Existenz und Lage des scheinbaren Quellorts abhängig von der Lage der wahren Quelle. In der Arbeit wird gezeigt, dass eine Unterscheidung beider Lösungen durch einen zusätzlichen Sensor innerhalb der konvexen Hülle der anderen Sensoren garantiert werden kann.

Im gestörten Fall sind mehr Sensoren notwendig, um einen Fehlerausgleich zu ermöglichen. Im zweiten Schritt des vorgestellten Verfahrens entsteht dann ein Optimierungsproblem für den Quellort, dessen Lösung numerisch keine Probleme bereitet und im Fall von Diffusion sogar direkt gelöst werden kann. Durch den Einsatz einer approximativ-optimalen Wichtungsstrategie mit automatischer Berechnung der Wichtungsfaktoren erreichen die Ergebnisse des vorgestellten Verfahrens annähernd die Güte einer Maximum-Likelihood-Schätzung, ohne jedoch die typischen Probleme ausgangsfehlerbasierter, einstufiger Verfahren (lokale Minima, Sattelpunkte im Gütegebirge) zu besitzen.

Die Implementierung des neuen Verfahrens in die Simulationsumgebung Matlab erlaubt umfangreiche simulative Untersuchungen anhand von Komplexbeispielen.

Die Ergebnisse der praktischen Erprobung in einem industriellen Chemikalienlager belegen die Leistungsfähigkeit der neuen Verfahren.

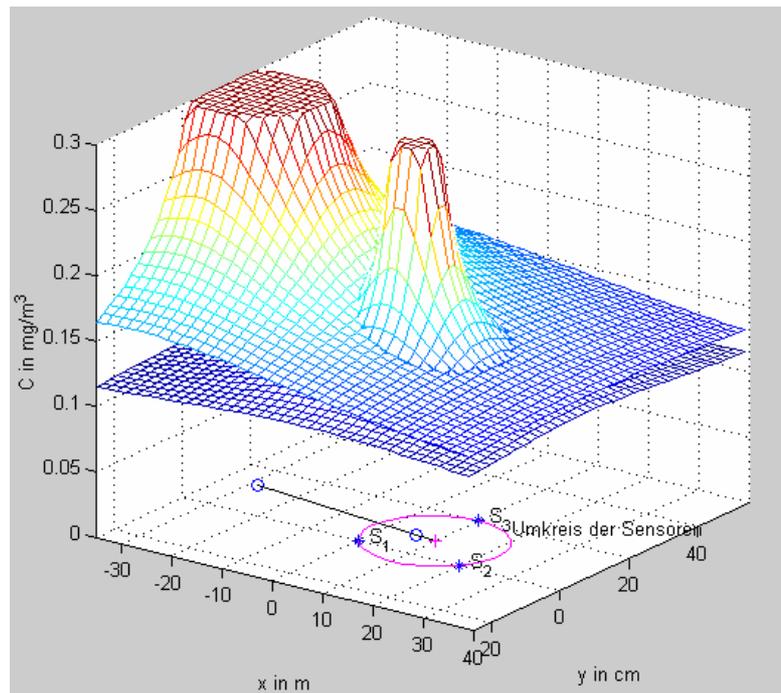


Abb. 1: Entstehung von wahren und scheinbarem Quellort

## Literatur:

- [1] H. Ishida, T. Nakamoto, T. Moriizumi, T. Kikas, J. Janata, Plume-tracking robots: A new application of chemical sensors. *Biological Bulletin*, 200:222--226, 2001.
- [2] A. Lilienthal, A. Zell, M. Wandel, U. Weimar, Sensing odour sources in indoor environments without a constant airflow by a mobile robot. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Seiten 4005-4009, Seoul, South Korea, 2000.
- [3] M. E. Alpay M. H. Shor, Model-based solution techniques for the source localization problem. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 8(6):893-902, 2000.
- [4] A. Nehorai, B. Porat, E. Paldi, Detection and localization of vapor-emitting sources. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 43(1):243-253, 1995.
- [5] J. Matthes, L. Gröll, H. B. Keller, Source localization by spatially distributed electronic noses for advection and diffusion. *IEEE Transactions on Signal Proc.*, 53(5), 2005.
- [6] J. Matthes, Eine neue Methode zur Quellenlokalisierung auf der Basis räumlich verteilter, punktwieser Konzentrationsmessungen. *Dissertation, Universität Karlsruhe*, 2004.

# Modellierung und Regelung beim Antrieb und Wickeln von elastischen Stoffbahnen : Überblick und neue Herausforderungen

Prof. Dr.-Ing. Dominique Knittel  
ERT Enroulement  
(Web Handling Research Group)  
Université Louis Pasteur  
IPST, 15 rue du Mal Lefèbvre  
F-67100 Strasbourg  
dominique.knittel@ipst-ulp.u-strasbg.fr

Em. Prof. Dr.-Ing. Eric Ostertag  
LSIIT - EAVR  
Université Louis Pasteur  
ENSPS, Bld Sébastien Brant  
F-67400 Illkirch  
eric.ostertag@ensps.u-strasbg.fr

**Schlüsselwörter** : Transport und Wickeln viskoelastischer Stoffbahnen,  $H_\infty$  Regelung,  $H_\infty$  Multi-Model und LPV Regelung, dezentrale Regelung, Zustandsregelung, LMI und BMI Optimierung

## Kurzfassung :

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 Folgenantrieben 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/Aufwickeln- und Transportsysteme viskoelastischer Stoffbahnen geben. Zuerst werden die an einem Labormodell, einer aus 3 Synchronmotoren bestehenden Anlage, erprobten  $H_\infty$  und LPV Gesamtregler mit dezentraler PI Regelung verglichen. Regelungsstrukturen mit Overlapping und Modell basierte Vorsteuerung sind ebenfalls untersucht worden. Für eine industrielle aus vielen Antrieben bestehenden Anlage können nur dezentrale Regelungen eingesetzt werden. Das identifizierte Drei-Motoren-Modell wurde in eine grössere Anlage erweitert und verschiedene dezentrale Regelungsstrukturen wurden daran erprobt.

## Literatur :

- [1] Koç, H., D. Knittel, M. de Mathelin, G. Abba. Modelling and robust control of winding systems for elastic webs, IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2002, vol. 10, n°2, p. 197-208.
- [2] Knittel D., E. Laroche, D. Gigan, H. Koç. Tension control for winding systems with two degrees of freedom  $H_\infty$  controller, IEEE Transactions on Industry Applications (IAS), 2003, vol. 39, No. 1, pp. 113-120.
- [3] D. Knittel. Robust control design using  $H_\infty$  methods in large scale web handling systems. 7th International Conference on Web Handling, IWEB'03, Stillwater, Oklahoma, 2003
- [4] Xu Y., D. Knittel, M. de Mathelin. Two-degrees-of-freedom gain scheduled control for quasi-periodic disturbance rejection: application in the unwinding of an eccentric roll. IFAC Symposium on Robust Control Design ROCOND'03, Milan, 2003
- [5] Benlatreche A., D. Knittel, E. Ostertag. Robust decentralized control strategies for large scale web handling systems, IFAC Conference in Large Scale Systems (LSS), Osaka, 2004.
- [6] Benlatreche A., D. Knittel, E. Ostertag. State feedback controllers synthesis using BMI optimization for large scale web handling systems, IFAC World Congress, Prague 2005
- [7] Claveau F., P. Chevrel, D. Knittel. A two degrees of freedom  $H_2$  controller design methodology for multi-motors web handling systems, American Control Conference, Portland, 2005
- [8] Pagilla P. R., D. Knittel. Advanced methods for web longitudinal control: recent algorithms and future directions, 8<sup>th</sup> International Conference on Web Handling, IWEB'05, Stillwater, Oklahoma, 2005
- [9] BenlatrecheA., D. Knittel, E. Ostertag. Robust decentralized control strategies for large scale web handling systems, submitted to Control Engineering Practice (IFAC)

# Steuerung und Regelung von mehrvariablen LTI-Regelstrecken in polynomialer Darstellung

S.-O. Lindert \*

K. Reinschke \*\*

\* Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie  
Technische Universität Dresden  
D - 01062 Dresden  
Tel.: +49 351 463 - 36444  
Fax.: +49 351 463 - 37281  
Email: Sven-Olaf.Lindert@tu-dresden.de

\*\* Institut für Regelungs- und Steuerungstheorie  
Technische Universität Dresden  
D - 01062 Dresden  
Tel.: +49 351 463 - 33940  
Fax.: +49 351 463 - 37281  
Email: kr@erss11.et.tu-dresden.de

**Schlüsselwörter:** Trajektoriensteuerung, Folgeregelung, polynomiale Darstellung, LTI-Regelstrecken, Basisgröße

In diesem Beitrag werden Regelstrecken, die sich durch ein Algebrodifferentialgleichungssystem modellieren lassen und mehrere Steuereingänge besitzen, betrachtet. Dabei wird vor allem an die nichtlinearen Bewegungsgleichungen mechanischer Systeme mit  $n$  Freiheitsgraden und  $m \geq 1$  Aktuatoren gedacht.

Nach Ermittlung der Gleichgewichtslagen und Linearisierung erhält man Kleinsignal-Modelle, die im Bildbereich eine polynomiale Systembeschreibung  $A_p(s)X_p + B_p(s)U = 0$  ergeben. Im Bildbereich werden  $m$  Basisgrößen  $\Xi(s)$  mit Hilfe einer teilerfremden rechten Matrizenbruchdarstellung der Übertragungsmatrix  $G_U^{X_p}(s)$  definiert. Die zugehörigen Basissignale  $\xi(t)$  genügen einem System von  $m$  linearen Algebrodifferentialgleichungen. Das Bildungsgesetz für die Gesamtheit aller möglichen Signalvektoren, die als Basissignale benutzt werden können, wird diskutiert. Aus der Vorgabe der zeitlichen Verläufe der  $m$  Basissignale folgen die zugehörigen Verläufe der  $m$  Steuersignale und aller übrigen Systemsignale auf eindeutige Weise. Diese mathematische Gesetzmäßigkeit lässt sich regelungstechnisch zur Trajektoriensteuerung nutzen.

Im Falle instabiler Übertragungsfunktionen von den Steuergrößen zu den Basisgrößen müssen die gewählten Trajektoriensteuerungen durch Folgeregelungen ergänzt werden.

Ein allgemeines Wirkungsplan-Schema der Trajektoriensteuerung mit Folgeregelung wird vorgestellt. Auch die Zusammenhänge zwischen den abstrakt definierten Basisgrößen und den physikalisch deutbaren Systemgrößen werden diskutiert.

Die allgemeine Methodik zum Entwurf einer Trajektoriensteuerung und eines Folgereglers wird anhand eines Simulationsbeispiels aus der Starrkörpermechanik illustriert.

## Literatur:

[1] Reinschke, K.: *Lineare Regelungs- und Steuerungstheorie*, Springer-Verlag, 2006

# Reglerentwurf für polynomiale Systeme mittels Dissipativität und der Summe-von-Quadraten Zerlegung

Christian Ebenbauer, Frank Allgöwer  
Insitut für Systemtheorie und Regelungstechnik (IST),  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 9, 70550 Stuttgart  
{ce,allgower}@ist.uni-stuttgart.de

**Schlagwörter:** Polynomiale Systeme, Dissipativität, Summe-von-Quadraten Zerlegung, Semidefinite Programmierung

Polynomiale Systeme sind nichtlineare Systeme mit polynomialen Nichtlinearitäten. In der Systemtheorie und Regelungstechnik begegnet man dieser Klasse von Systemen in einer Vielzahl von Anwendung. Insbesondere in der Verfahrenstechnik und Mechatronik aber auch in neuen Forschungsgebieten, wie zum Beispiel der Systembiologie, lassen sich viele systemtheoretische und regelungstechnische Aufgaben in Form von polynomialen Strecken modellieren oder approximieren. In den letzten fünf Jahren konnten erhebliche Fortschritte bei der Analyse und beim Entwurf von polynomialen Systemen erzielt werden (siehe zum Beispiel [5, 9, 7, 3, 2]). Ein Hauptgrund dafür war die Entwicklung einer effizienten Methode, der sogenannten Summe-von-Quadraten Zerlegung, welche es erlaubt Polynome in mehreren Veränderlichen in Quadratsummen von Polynomen zu zerlegen [1, 6, 5]. Somit kann mit dieser Methode ein Polynom auf Semidefinitheit überprüft werden. Der entscheidende Vorteil dieser Methode liegt in der Tatsache, dass diese Zerlegung in Quadratsummen mittels der semidefiniten Programmierung, also mit Hilfe der konvexen Optimierung durchgeführt werden kann. Darüber hinaus kann mit diesem Ansatz nicht nur Semidefinitheit überprüft werden, sondern auch polynomiale Ungleichungen gelöst werden. Für den Einsatz dieser Methoden müssen also die zu lösenden Aufgaben in Form von Ungleichungen formuliert werden. Dazu kann in der Systemtheorie und der Regelungstechnik auf das klassische Konzept der Dissipativitätsungleichung zurückgegriffen werden. Das Konzept der Dissipativität ist ein sehr mächtiges and flexibles Werkzeug, mit dem insbesondere in den letzten 15 Jahren sehr viel gearbeitet wurde [4, 8]. Die Kombination der drei Komponenten polynomiale Systeme, Summe-von-Quadraten Zerlegung und Dissipativität erlaubt es somit eine Vielzahl von schwierigen und hochgradig nichtlinearen Analyse- und Entwurfsaufgaben zu lösen. Über den aktuellen Stand der Forschung auf diesem neuen Themengebiet soll in diesem Vortrag berichtet werden.

## Literatur

- [1] M.D. Choi, T.Y. Lam, and B. Reznick. Sums of squares of real polynomials. In *Proc. of Symposia in Pure Mathematics*, volume 58, pages 103–126, 1995.
- [2] C. Ebenbauer and F. Allgöwer. Stability analysis of constrained control systems: An alternative approach. *System and Control Letters*, 2005. Provisionally accepted for publication.
- [3] C. Ebenbauer, T. Raff, and F. Allgöwer. Passivity-based feedback design for polynomial control systems. *Automatisierungstechnik (at)*, 8:356–366, 2005.
- [4] A. Kugi and K. Schlacher. Analyse und Synthese nichtlinearer dissipativer Systeme: Ein Überblick. *Automatisierungstechnik*, 2,3:63–69,103–111, 2002.
- [5] P.A. Parrilo. *Structured Semidefinite Programs and Semialgebraic Geometry Methods in Robustness and Optimization*. PhD thesis, California Institute of Technology, 2000.
- [6] V. Powers and T. Wörmann. An algorithm for sums of squares of real polynomials. *J. of Pure and Applied Algebra*, 127, 1998.
- [7] S. Prajna, P. Parrilo, and A. Rantzer. Nonlinear control synthesis by convex optimization. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 49(2):310–314, 2004.
- [8] R. Sepulchre, M. Janković, and P. Kokotović. *Constructive Nonlinear Control*. Springer Verlag, 1997.
- [9] B. Tibken. Estimation of the domain of attraction for polynomial systems via LMI's. In *Proc. of the 39th IEEE Conference on Decision and Control, Sydney, Australia*, pages 3860–3864, 2000.

# Modellierung und Regelung von piezoelektrischen Balken

H. Ennsbrunner \*

K. Schlacher \*\*

\* Institut für Regelungstechnik und Prozessautomatisierung

Johannes Kepler Universität Linz  
4040 Linz, Austria  
Tel.: +43 732 2468 – 9733  
Fax.: +43 732 2468 – 9734  
Email: helmut.ennsbrunner@jku.at

\*\* Institut für Regelungstechnik und Prozessautomatisierung

Johannes Kepler Universität Linz  
4040 Linz, Austria  
Tel.: +43 732 2468 – 9730  
Fax.: +43 732 2468 – 9734  
Email: kurt.schlacher@jku.at

**Schlüsselwörter:** Piezoelektrische Balken, Modellierung, Variationsrechnung, Maple Package „JetVariationalCalculus“, passivitätsbasierte Regelung

In diesem Beitrag wird die software-unterstützte Modellierung und die passivitätsbasierte Regelung von piezoelektrischen Balken behandelt.

Die mathematische Modellierung von physikalischen Systemen fußt auf physikalischen Grundgesetzen, die es ermöglichen das Systemverhalten in Form von Lösungen bestimmter Differentialgleichungen zu interpretieren. Es ist nun möglich die Bewegungsgleichungen von piezoelektrischen Systemen über ein Variationsprinzip – dem Hamilton’schen Prinzip – herzuleiten. Dieser Zugang wird z.B. in [1] verwendet um die Bewegungsgleichungen eines geschichteten Piezobalkens mit Hilfe der Variationsrechnung zu bestimmen. Dabei wird von der *Bernoulli-Euler*-Hypothese in Kombination mit dem linearen piezoelektrischen Materialgesetz Gebrauch gemacht.

Im Rahmen dieses Beitrags werden nun Anforderungen an allgemeine piezoelektrische Materialgesetze diskutiert, die auch im nichtlinearen Fall die Formulierung einer „gespeicherten Energie“ Funktion erlauben. Darauf basierend werden die entsprechenden Feldgleichungen bestimmt und diskutiert.

Weiters wird die Modellierung eines piezoelektrischen Balkens unter Verwendung der *Timoshenko*-Hypothese gezeigt. Für die Bestimmung der zugehörigen Bewegungsgleichungen wird das Maple Paket „JetVariationalCalculus“ [2] verwendet, welches im Stande ist, zu einem gegebenen Variationsproblem die Gebiets- und Randbedingungen in Form partieller Differentialgleichungen zu bestimmen.

Abschließend wird die passivitätsbasierte Regelung des piezoelektrischen Balkens unter Verwendung der „port Hamilton’schen“ Darstellung des Balkens vorgestellt und deren Stabilität diskutiert.

## Literatur:

- [1] Kugi, A.: *Non-linear Control Based on Physical Models*, Springer-Verlag, 2001
- [2] Ennsbrunner, H und Schlacher, K.: *A Maple Package for the Calculus of Variations based on Jet Manifolds*, MCMDS Vol. 11, 2005

# Protektive Beatmung – Automatisierungstechnik als Schlüsseltechnologie

H. Lüpschen\* und S. Leonhardt\*

\* Philips Lehrstuhl für Medizinische Informationstechnik  
Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik  
RWTH Aachen, Pauwelsstr. 20  
52074 Aachen  
Tel.: 0241-80 23202  
FAX: 0241-80 82442  
Email: luepschen, leonhardt@hia.rwth-aachen.de

**Schlüsselwörter:** schonende Beatmungsformen, individualisierte Therapie, Identifikation von Lungenparametern, Regelung des Gasaustausches

Die künstliche Beatmung ist eine oft lebensrettende, aber gerade bei längerem Einsatz häufig auch lungenschädigende Therapieform. Um die beatmungsinduzierten Gewebeschäden bei empfindlichen Lungen zu reduzieren, wird seit einiger Zeit empfohlen, bei Patienten mit Lungenversagen (ARDS) nur noch mit kleinen Tidalvolumen zu beatmen und ggf. die Atemfrequenz etwas zu erhöhen ([1]). Zusätzlich wird derzeit in einigen Studien untersucht, ob ein spezielles Verfahren zur manuellen Blähung der Lunge, das sog. „open lung concept“, auch im klinischen Einsatz die aus dem Tierversuch bekannten positiven Effekte aufweist ([2]).

Während sich regelungstechnische Maßnahmen in der Vergangenheit häufig auf geräteinterne Vorgänge beschränkt haben, ist in der Medizintechnik zunehmend die Tendenz zu beobachten, nicht nur den Patienten in den Regelkreis einzubeziehen, sondern auch auf physiologische Signale als Zielgröße zu regeln, vgl. [3,4]. Ein erstes klinisch zugelassenes Beispiel zur automatisierten Entwöhnung von der Beatmung wurde kürzlich in ([5]) vorgestellt.

Im Vortrag wird auf die Automatisierung der protektiven Beatmung und des „open lung concepts“ eingegangen. Hierzu werden verschiedene Sensorsignale ausgewertet und das Beatmungsgerät von einem Steuerrechner vollelektronisch angesteuert, vgl. Abbildung 1.

Im Speziellen werden Methoden zur Steuerung und Regelung der Blähmanöver und der Überwachung riskanter hämodynamischer Zustände vorgestellt, vgl. [6]. Grundlage für die individuelle Anpassung der Therapie ist dabei die jeweils aktuelle Identifikation der mechanischen Eigenschaften und des Gasaustauschvermögens der Lunge.

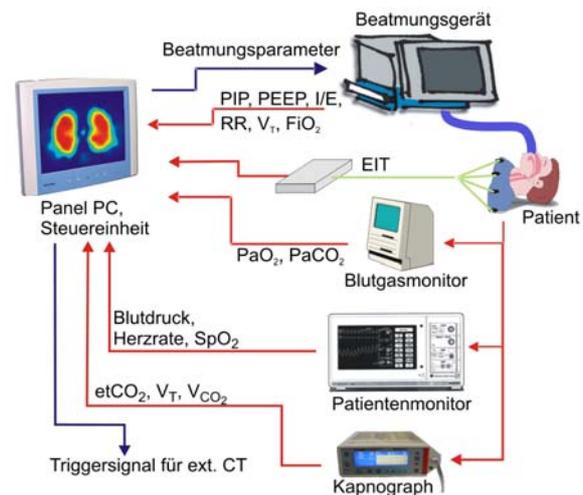


Abbildung 1: Blockschaltbild zur automatisierten, protektiven Beatmungsstrategie

## Literatur:

- [1] ARDS CLINICAL TRIALS NETWORK, "Ventilation with lower tidal volumes as compared with traditional tidal volumes for acute lung injury and the acute respiratory distress syndrome", New England Journal of Medicine, 342, pp. 1301-1308, 2000.
- [2] S. Leonhardt, S. Böhm und B. Lachmann, "Identifikation und Optimierung der Beatmung beim akuten Lungenversagen", at - Automatisierungstechnik, Vol. 46, No. 11, pp. 532 - 539, 1998.
- [3] Löser, R.E., „Medizintechnische Geräte – Eine Herausforderung an die Automatisierungstechnik“, at - Automatisierungstechnik, Vol. 47, Nr. 2, pp. 80-88, 1999.
- [4] S. Leonhardt, "Automatisierungstechnik in Beatmungsgeräten und Anästhesiemaschinen", VDE Kongress, Band 2, pp. 295 - 299, Dresden, 21.-23. Oktober 2002.
- [5] S. Mersmann und M. Dojat, "SmartCare<sup>TM</sup> – Automated Clinical Guidelines in Critical Care", 16th European Conference on Artificial Intelligence, Valencia (Spain), p.745-749, 2004.
- [6] H. Lüpschen, T. Meier, M. Grossherr, T. Leibecke and S. Leonhardt, „Optimization of Artificial Ventilation Therapy based on Automatic Identification of Lung Properties“, 3<sup>rd</sup> European Medical & Biological Engineering Conference (EMBEC'05), Prague, Nov. 20<sup>th</sup>-25<sup>th</sup>, 2005.

# Neue Ansätze zur Rehabilitation gelähmter Menschen mittels geregelter Funktioneller Elektrischer Stimulation (FES)

Thomas Schauer<sup>1,2</sup>

Jörg Raisch<sup>2,1</sup>

<sup>1</sup> Fachgruppe System- und Regelungstheorie

<sup>2</sup> Lehrstuhl für Systemtheorie technischer Prozesse/

Max-Planck-Institut für Dynamik komplexer technischer Systeme

Institut für Automatisierungstechnik  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Sandtorstr. 1, 39106 Magdeburg

Universitätsplatz 2, 39016 Magdeburg

Tel. +49 (0)391-6110-431

Tel. +49 (0)391-67-18708

Fax +49 (0)391-6110-601

Fax +49 (0)391 67-11191

Email: [schauer@mpi-magdeburg.mpg.de](mailto:schauer@mpi-magdeburg.mpg.de)

Email: [Joerg.Raisch@e-technik.uni-magdeburg.de](mailto:Joerg.Raisch@e-technik.uni-magdeburg.de)

**Schlüsselwörter:** Elektrostimulation, Neuroprothetik, Elektromyographie

Verletzungen des Rückenmarks und Schlaganfälle sind die Hauptursachen von motorischen Lähmungen der unteren und der oberen Extremitäten. Hierbei ist zwar der Informationsfluss vom zentralen Nervensystem zu den betroffenen Muskeln unterbrochen, die Muskeln und die sie innervierenden peripheren motorischen Neuronen sind aber oft noch intakt. In diesem Fall können die Muskeln durch künstliche Reizung peripherer motorischer Nerven zur Kontraktion gebracht werden. Alternativ ist die Reizung sensorischer Nerven möglich. Muskelkontraktionen werden dann über noch intakte Reflexbögen getriggert. Die Generierung vorgegebener Bewegungen mittels elektrischer Stimulation wird als Funktionelle Elektrische Stimulation (FES) oder Neuroprothetik bezeichnet. Neben dem direkten funktionellen Effekt besitzt FES einen doppelten therapeutischen Nutzen: Abhängig vom Grad der Lähmung kann es durch wiederholte Anwendung von FES zu einer Verbesserung der Willkürmotorik kommen (sog. Carry-over Effekt). Wiederholtes Anwenden von FES kann außerdem Folgeerscheinungen der Lähmung, wie zum Beispiel Muskelschwund, Spastik und Herz-Kreislauf-Schwäche, entgegenwirken.

Die Realisierung komplexer Bewegungsabläufe (wie z.B. Gehen oder Fahrradfahren) durch elektrische Stimulation erfordert eine Regelung und damit eine Erfassung des Bewegungszustands mittels entsprechender Sensorik. Eine wesentliche Erschwernis der Regelungsaufgabe folgt aus der vorhandenen restlichen Willküraktivität der betroffenen Muskelgruppen.

In diesem Vortrag werden neue FES-Anwendungen vorgestellt. Hierzu gehören: a) Liegedreiradfahren und Ergometertraining durch Stimulation der gelähmten Beinmuskulatur [1-3], b) FES-unterstütztes Gangtraining von halbseitig gelähmten Schlaganfallpatienten [4], c) Verstärkung von Rest-Willküraktivitäten auf der Basis von EMG (elektromyographischen) Messungen und EMG-geregelter Elektrostimulation [5]. Für die genannten Anwendungen werden medizinische Motivation, regelungstechnische Probleme und praktische Umsetzung diskutiert.

## Literatur:

[1] T. Schauer, K. J. Hunt, N.-O. Negård, M. H. Fraser und W. Stewart. Regelung der Trittggeschwindigkeit beim Liegedreiradfahren von Querschnittgelähmten. *at - Automatisierungstechnik*, 50(6):271-278, 2002.

- [2] K. J. Hunt, B. Stone, N.-O. Negård, T. Schauer, M. H. Fraser, A.J. Cathcart, C. Ferrario, S. Grant und S.A. Ward. Control Strategies for Integration of Electrical Motor Assist and Functional Electrical Stimulation in Paraplegic Cycling: Utility for Exercise Testing and Mobile Cycling. *IEEE Trans. on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 12(1):89-101, 2004.
- [3] T. Schauer, R. Salbert, N.-O. Negård, K. Hunt und J. Raisch. Belastungsregelung in der Elektrostimulationsergometrie. *at – Automatisierungstechnik* (zur Veröffentlichung angenommen, voraussichtlich Dezember 2005).
- [4] N.-O. Negård, S. Andres, R. Kauert, T. Schauer und J. Raisch. Gait phases detection and step length estimation of gait by means of inertial sensors. In *Proc. of the 3rd European Medical & Biological Engineering Conference*, Prag, November 2005.
- [5] T. Schauer, R. Salbert, N.-O. Negård und J. Raisch. Detection and Filtering of EMG for Assessing Voluntary Muscle Activity during FES. In *Proc. of the 9th Annual Conference of the International Functional Electrical Stimulation Society (IFESS 2004)*, Seiten 185-187. Bournemouth, UK, September 2004.

# Dynamische Identifikation mit Neuro-Fuzzy Netzen

Dr. Stefan Jakubek

Institut f. Mechanik u. Mechatronik/A5  
TU Wien  
A-1040, Gußhausstrasse 27-29  
+43-01-58801-32811  
+43-01-58801-32899  
jakubek@impa.tuwien.ac.at

DI Christoph Hametner

Institut f. Mechanik u. Mechatronik/A5  
TU Wien  
A-1040, Gußhausstrasse 27-29  
+43-01-58801-32815  
+43-01-58801-32899  
hametner@impa.tuwien.ac.at

**Schlüsselwörter:** Dynamische Identifikation, Neuronale Netze, verrauschte Eingangsdaten, Stationärpunkte

Diese Arbeit behandelt die Identifikation nichtlinearer dynamischer Prozesse mit lokalen Neuro-Fuzzy Netzen. Zum Training wird der in [1] vorgestellte Algorithmus verwendet. Es werden Lösungsansätze für zwei wesentliche Problemstellungen der dynamischen Identifikation präsentiert:

Einerseits wird die Problematik unterschiedlich verrauschter Ein- und Ausgangsdaten behandelt, die bei der Parameterbestimmung mit herkömmlichen Regressionsmethoden zu biasbehafteten Resultaten führt. Als Lösungsweg wird die *Total-Least-Squares* Methode vorgestellt.

Andererseits wird eine Methode vorgestellt, mit der die *Einhaltung von Stationärpunkten* erzwungen werden kann, was wesentlich zur Verbesserung der stationären Genauigkeit des Modells beiträgt. Resultate aus einem Praxisbeispiel illustrieren die Anwendbarkeit beider Konzepte.

Die Schätzung der lokalen Modellparameter  $\theta_j$  durch Least-Squares beruht auf einer Minimierung des Prädiktionsfehlers an den Trainingsdatenpunkten:

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i - \hat{y}_i]^2$$

Bei der Identifikation dynamischer Prozessmodelle enthalten die Regressoren vergangene Ein- und Ausgänge des Prozesses, das Messrauschen beeinflusst also sowohl die Zielgröße  $y(k)$ , als auch den Regressor selbst. Diese Korrelation bewirkt, dass die Parameter durch Least Squares nicht biasfrei geschätzt werden.

Um im Fall verrauschter Ein- und Ausgangsdaten eine biasfreie Parameterschätzung zu erhalten, müssen sowohl Eingänge als auch Ausgänge rekonstruiert werden. Das bedeutet, dass folgendes Funktional minimiert werden muß:

$$J = \frac{1}{2N} \left\{ \sum_{i=1}^N [x_i - \hat{x}_i]^2 + \sum_{i=1}^N [y_i - \hat{y}_i]^2 \right\}$$

Die Minimierung führt auf das Total-Least-Squares Verfahren (TLS), das in der Vergangenheit schon mehrfach für die Lösung der angegebenen Problematik vorgeschlagen wurde [2,3]. Dabei werden sowohl die Ausgänge  $y$  als auch die Regressoren  $X$  durch Rekonstruktionen ersetzt:

$$\mathbf{y}, \mathbf{X} \Rightarrow \hat{\mathbf{y}}, \hat{\mathbf{X}}$$

wobei noch gelten muß

$$\hat{\mathbf{y}} \in \text{Image}(\hat{\mathbf{X}}) \quad \text{und} \quad \|\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}} \mid \mathbf{X} - \hat{\mathbf{X}}\|_F = \min.$$

Besonders bei Modellen, die für Diagnosekonzepte oder für Optimierung eingesetzt werden sollen, werden hohe stationäre Genauigkeitsanforderungen gestellt, [4]. Eine gute Strategie zur Erfüllung dieser Anforderungen besteht darin, die Einhaltung gewisser stationärer Punkte durch das Modell zu *erzwingen*. Die verbleibenden Freiheitsgrade des Modells werden dann durch LS bzw. TLS zur Optimierung der dynamischen Abbildungsqualität des Modells eingesetzt. Während stationärer Phasen gilt für den Regressor

$$\mathbf{x}_s^T(i) = [y_s(i) \ y_s(i) \ \dots | u_s(i) \ u_s(i) \ \dots]$$

und neben der Optimierung der Parameter gemäß

$$J = (\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\theta}_j)^T (\mathbf{y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\theta}_j) = \min.$$

ist zusätzlich noch

$$\mathbf{x}_s^T(i)\boldsymbol{\theta}_j = y_s(i)$$

zu erfüllen. Die resultierende Optimierung mit Nebenbedingungen wird mit der Technik der Lagrange'schen Multiplikatoren realisiert.

Die Erprobung der beiden Elemente Total-Least-Squares und Stationärpunkte erfolgte an einem Modell der Abgastemperatur eines

turboaufgeladenen Großgasmotors. Abbildung 1 zeigt die

Auswirkung der Parameterbestimmung

mittel TLS anhand der Autokorrelationsfunktionen des

Prädiktionsfehlers an Validierungsdaten: Während bei

LS-Parameteroptimierung (Abbildung 1, oben) die

Fehler-

dynamik signifikant ist, tritt bei TLS-Optimierung eine

deutliche Verbesserung auf (Abbildung 1, unten).

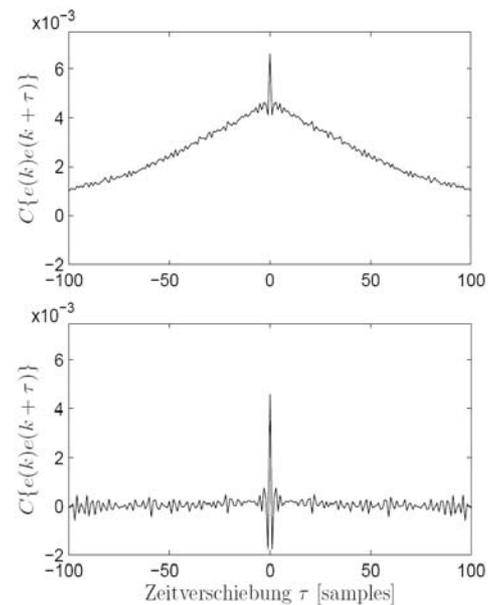


Abbildung 1:

### Autokorrelationsfunktion des Prädiktionsfehlers

In Abb.2 wird die Abgastemperaturmessung

mit zwei Simulationsmodellen verglichen:

Einerseits mit einem Modell mit antrainierten

Stationärpunkten und andererseits mit einem, dessen

Parameter herkömmlich optimiert wurden. Hier ist

deutlich zu sehen, wie das Konzept der Stationärpunkte

die Genauigkeit verbessert und den systematischen Bias

beseitigt

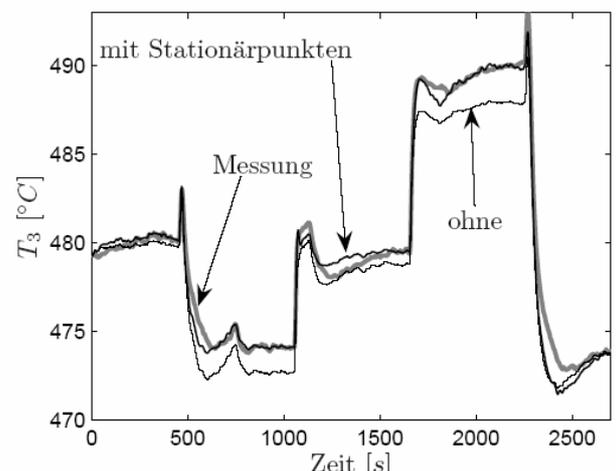


Abbildung 2: Auswirkung von Stationärpunkten

### Literatur:

[1] S. Jakubek and N. Keuth. Optimierte Neuro-Fuzzy-Modelle für Auslegungsprozesse und Simulation im Automotive-Bereich. *Automatisierungstechnik - at*, 53:425–433, Sept. 2005

[2] Scherrer W. Heij C. Consistency of system identification by global total least squares. *Automatica*, 35:993–1008, 1999.

[3] I. Markovsky, J.C. Willems, S. Van Huffel, B. De Moor, and R. Pintelon. Application of structured total least squares for system identification. In *43rd IEEE Conference on Decision and Control*, volume 4, pages 3382–3387. IEEE, 2004.

[4] R. Zimmerschied, M. Weber, and Isermann R. Stationäre und dynamische Motorvermessung zur Auslegung von Steuerkennfeldern - Eine kurze Übersicht. *Automatisierungstechnik - at*, 53:87–94, Februar 2005.

# Modellbasierte Diagnose auf der Basis von Dualität in Petrinetzen – Eine Machbarkeitsstudie im Bereich Motorsteuerung

Jörg Rudolf Müller \*

\* Institut für Verkehrssicherheit und  
Automatisierungstechnik  
Technische Universität Braunschweig  
Langer Kamp 8  
38106 Braunschweig  
+49 531 391 3328  
+49 531 391 5197  
m23@iva.ing.tu-bs.de

Eckehard Schnieder \*\*

\*\* Institut für Verkehrssicherheit und  
Automatisierungstechnik  
Technische Universität Braunschweig  
Langer Kamp 8  
38106 Braunschweig  
+49 531 391 3317  
+49 531 391 5197  
e.schnieder@tu-bs.de

**Schlüsselwörter:** Petrinetze, Diagnose, Duales Netz, Motorsteuerung und -diagnose

Im Allgemeinen besteht der Kern jeder Fehlerdiagnose in (technischen) Systemen aus der Identifikation von Abhängigkeiten zwischen (beobachteten) Fehlern (z. B. unerwartete Zustände werden erreicht oder erwartete Ereignisse bleiben aus) und deren Ursachen. Im Bereich der Motorsteuerung ist schon heute ein wesentlicher Teil der Steuerungssoftware für die Überwachung zuständig (z. B. Unterbrechungs- und Kurzschlussüberwachung der elektrischen Leitungen von Sensorik und Aktorik und eine „grobe“ Plausibilitätsüberprüfung der Sensorsignale untereinander). Mit solch einfachen Methoden ist es jedoch weder möglich umfassende Fehler im Bereich des Motors frühzeitig zu erkennen, noch eine Diagnose, also das Schließen auf Ursachen, durchzuführen. Das Prognostizieren von Folgefehlern aufgrund von beobachteten Fehlern, wird ebenfalls nicht durchgeführt. Durch Verwendung von analytischem Prozesswissen in Form mathematischer Modelle erlauben modellbasierte Fehlererkennungs- und Diagnosemethoden interne Prozessgrößen zu ermitteln und so auf rechnerischem Weg eine Erkennung, Diagnose und Bewertung von Fehlern durchzuführen (siehe [2,3]). Die zur Diagnose notwendigen Kausalitäten zwischen Fehlerursache und Fehler (auch: „Symptom“) werden in diesen Ansätzen im Allgemeinen durch intensive Gespräche in vielen Expertenrunden ermittelt. Die Repräsentation der Abhängigkeiten in (semi-) formalen Tabellen dient dann als Grundlage zur Fehlerdiagnose.

In diesem Beitrag wird vorgestellt, wie man ein (formales) Petrinetz-Systemmodell (auch Funktionsmodell oder primales Modell) unter Rückgriff auf die Dualraumtheorie der Linearen Algebra ohne Verlust von Informationen in ein Petrinetz-Fehlermodell (auch Diagnosemodell oder duales Modell) transformieren kann. In diesem ist dann sowohl die Ursachensuche aufgrund von beobachteten Fehlern (Fehlerdiagnose) als auch die Voraussage von Folgefehlern (Fehlerprognose) zumindest grundsätzlich möglich.

Anhand einer vereinfachten Luftstrecke eines turbogetriebenen Motors, die Gegenstand einer Machbarkeitsstudie zur Onboard-Diagnose war, wird die Anwendbarkeit dieses Dualitätskonzepts zur formalen Diagnose demonstriert.

**Literatur:**

- [1] Genrich, H.; Lautenbach, K. (1979). *The analysis of distributed systems by means of predicate-/transition nets*. In LNCS 70, pages 123-146.
- [2] Hartmanshenn, E.; Kimmich, F.; Schwarte, A.; Isermann, R. (2003). *Fehlerdiagnosemethoden für Diesel- und Ottomotoren*, Aachener Kolloquium, Aachen.
- [3] Isermann, R.; Hartmanshenn, E. (2004). *Diagnosemethoden für Verbrennungsmotoren – Modellbasierte Fehlererkennung und Fehlerdiagnose*, URL: [http://de.etasgroup.com/downloads/rt/rt\\_2004\\_01\\_30\\_de.pdf](http://de.etasgroup.com/downloads/rt/rt_2004_01_30_de.pdf)
- [4] Lautenbach, K. (2003). *Duality of Marked Place/Transition Nets*. Fachberichte Informatik 18-2003, Universität Koblenz-Landau, Institut für Informatik, Rheinau 1, D-56075 Koblenz.
- [5] Müller, J. R. (2004). *Dualität und Analyse von Formalen Modellen – Prädikat/Transitions-Netze und ihr Bezug zur Linearen Algebra*, Dissertation, Universität Koblenz-Landau, Fölbach-Verlag.
- [6] Petri, C. A. (1962). *Kommunikation mit Automaten*, Schriften des Instituts für instrumentelle Mathematik, Bonn.
- [7] Schnieder, E. (1999). *Methoden der Automatisierung – Beschreibungsmittel, Modellkonzepte und Werkzeuge für Automatisierungssysteme*, Vieweg-Verlag.

## Polynomial Control: Past, Present and Future

Vladimír Kučera

Czech Technical University in Prague, Czech Republic

kucera@fel.cvut.cz, <http://www.fel.cvut.cz/dean/>

Polynomial techniques have made important contributions to systems and control theory. Engineers in industry often find polynomial and frequency domain methods easier to utilize than state equation based techniques. Control theorists show that results obtained in isolation using either approach are in fact closely related.

Polynomial system description provides input-output models for linear systems with rational transfer functions. These models display two important system properties, namely poles and zeros, in a transparent manner. A performance specification in terms of polynomials is natural in many situations; see pole allocation techniques.

A specific control system design technique, called polynomial equation approach, was developed in the 1960s and 1970s. The distinguishing feature of this technique is a reduction of controller synthesis to a solution of linear polynomial equations of specific (Diophantine or Bézout) type.

In most cases, control systems are designed to be stable and to meet additional specifications, such as optimality and robustness. It is therefore natural to design the systems step by step: stabilization first, then the additional specifications each at a time. For this it is obviously necessary to have any and all solutions of the current step available before proceeding any further.

This motivates the need for a parametrization of all controllers that stabilize a given plant. In fact this result has become a key tool for the sequential design paradigm. The additional specifications are met by selecting an appropriate parameter. This is simple, systematic, and transparent. However, the strategy suffers from an excessive grow of the controller order.

This plenary lecture is a guided tour through the polynomial control system design. The origins of the parametrization of stabilizing controllers, called Youla or Youla-Kučera parametrization, are explained. Historical and personal notes are added. Standard results on pole placement and  $H_2$  control are summarized. New and exciting applications of the parametrization result are then discussed: stabilization subject to input constraints, output overshoot reduction, fixed order controller design, and robust stabilization.

The lecture will also introduce the International Federation of Automatic Control, known as IFAC, which represents the worldwide community of automatic control. IFAC is an association of national professional organizations whose aim is to promote the science and technology of automatic control in engineering, economic, biological, and social systems. This aim is pursued by organizing technical meetings and publishing journals.

The most important event is the IFAC World Congress, which is held every three years. The first congress was in Moscow in 1960, the second one in Basel in 1963, the third one in London in 1966 and so on; the last congress was held in Prague in 2005. The next IFAC World Congresses are scheduled in Seoul 2008 and Milan 2011.

The conception of IFAC took place in Heidelberg, where the German VDI/VDE-Fachgruppe Regelungstechnik organized an International Conference on Automatic Control in September 1956. At that conference, 30 participants signed a declaration in which the need to create an international organization of automatic control was clearly stated. The first constituent meeting then took place in Paris in 1957.

The IFAC 50th Anniversary Celebration event will be held again in Heidelberg on September 15, 2006.

# Bildgestützte Navigation von mobilen Robotern mit einem omnidirektionalen Kamerasystem

Frank Hoffmann

Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik  
Universität Dortmund  
44221 Dortmund  
Tel.: 0231 / 7553998  
Fax: 0231 / 7552752  
frank.hoffmann@uni-dortmund.de

Thomas Nierobisch

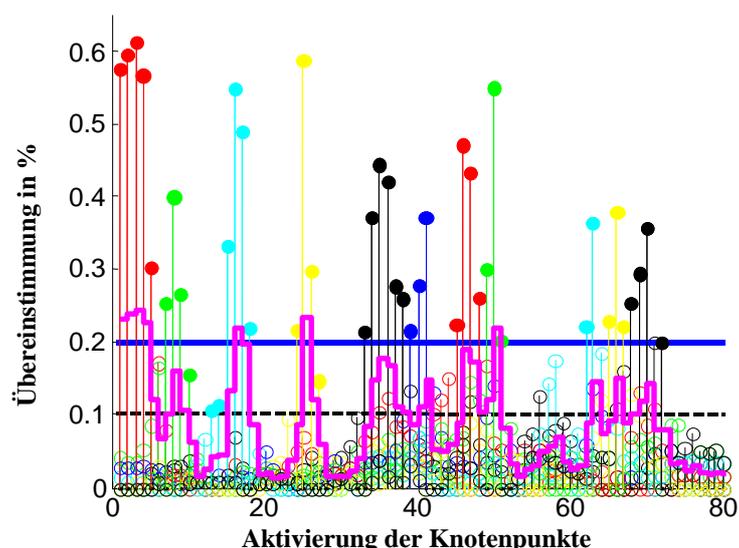
Lehrstuhl für Regelungssystemtechnik  
Universität Dortmund  
44221 Dortmund  
Tel.: 0231 / 7552745  
Fax: 0231 / 7552752  
thomas.nierobisch@uni-dortmund.de

**Schlüsselwörter:** Navigation, Verhaltensbasierte Robotik, Omnidirektionale Kamera, Topologische Lokalisation, SIFT-Merkmale

Dieser Beitrag beschreibt ein neues Verfahren zur bildbasierten Navigation mobiler Roboter in unstrukturierten Umgebungen mit Hilfe einer omnidirektionalen Kamera.

Zum Aufbau einer topologischen Karte wird der Roboter während einer Demonstration durch seine Umwelt geführt, und an markanten Wegpunkten, wie Türen oder Verzweigungen, werden Referenzbilder der lokalen Umgebung aufgenommen. Auf eine gezielte Strukturierung der Umgebung mit künstlichen Landmarken wird verzichtet. Stattdessen erfolgt die Lokalisation über sogenannte SIFT-Merkmale [1], die natürlich in der Umwelt auftreten und sich eindeutig und robust identifizieren lassen. Einzelne Orte werden dabei durch den im omnidirektionalen Bild der zugehörigen Umgebung detektierten Satz von SIFT-Merkmalen beschrieben. Die Lokalisation in der topologischen Karte erfolgt anhand der Ähnlichkeit der aktuellen Ansicht mit den bei der Demonstration gespeicherten Referenzbildern. Das häufige Auftreten von SIFT-Merkmalen in natürlichen Umgebungen erlaubt es Wegpunkte an beliebige Orte zu plazieren, ohne sich dabei auf spezifische Landmarken zu beziehen. Als Maß der Ähnlichkeit zweier Orte dient die relative Häufigkeit der wiedererkannten SIFT-Merkmale im aktuellen Bild zu denen im Referenz-

bild. Ein Wegpunkt gilt als erkannt, wenn mindestens 20 % der Merkmale übereinstimmen. Die Schwelle wird bis auf 10 % herabgesetzt, solange die Ähnlichkeit des Ortes mit der größten Übereinstimmung deutlich über der des Ortes mit der zweitgrößten Übereinstimmung liegt. In einem realen Experiment zur Evaluierung der Praxistauglichkeit und Robustheit der Methode durchfährt der



Roboter elf zuvor demonstrierte aufeinanderfolgende Wegpunkte.

Abbildung 1: Ortsspezifität der SIFT-Merkmale

Abbildung 1 zeigt die Aktivierung der einzelnen Wegpunkte bei einer erneuten Durchfahrt des Flures zu einem späteren Zeitpunkt unter anderen Lichtverhältnissen. Die Wegpunkte werden nicht nur in der richtigen Reihenfolge detektiert, sondern die Spezifität der Lokalisation bestätigt sich auch dadurch, dass die relative Häufigkeit der Merkmale nur in der lokalen

Umgebung des zugehörigen Ortes signifikant hoch ist. Die Robustheit der Methode wird insofern deutlich, als alle Wegpunkte beim Passieren zuverlässig erkannt werden. Da jeder Ort durch eine Vielzahl von SIFT-Merkmalen beschrieben wird, erweist sich die Methode robust gegenüber Verdeckungen von Merkmalen und dynamischen Änderungen der Umgebung.

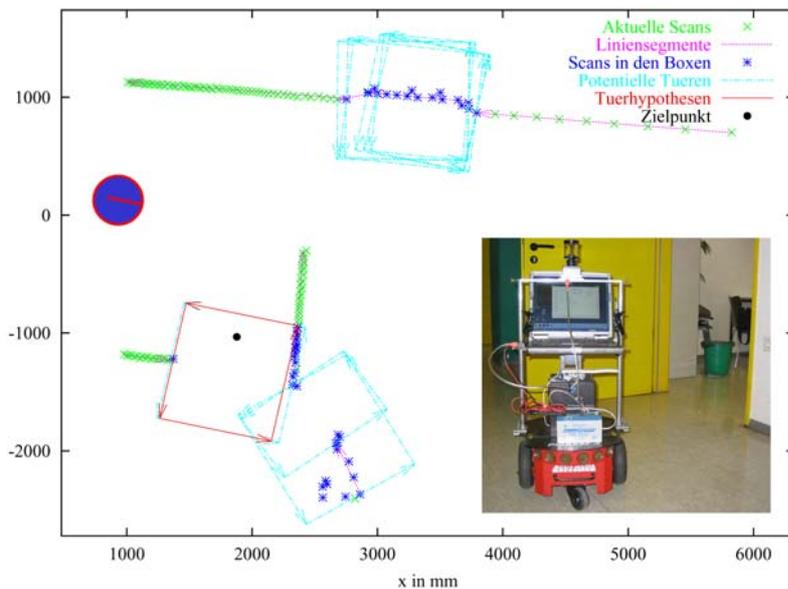


Abbildung 2: Türerkennung und Boxengenerierung

Die Navigation verwendet eine hierarchische Architektur, bestehend aus einer planenden Schicht und einer untergeordneten Ausführungsschicht. Die Aufgabe der Planungsschicht besteht neben der Wegplanung und Überwachung in der kontextabhängigen Aktivierung einzelner Verhalten. So wird das Türdurchfahrtverhalten in dem Moment aktiviert, in welchem die bildbasierte Lokalisation die laut Wegplan zu passierende Tür anhand des zugeordneten Referenzbildes erkennt. In der Verhaltensbasierten Robotik bildet ein Verhalten den durch die Sensorik wahrgenommene Umgebungssituation auf eine Handlung in Form von Motorstellgrößen ab [2]. Die Besonderheit von Fuzzy Verhalten besteht darin, dass diese anstelle einer einzigen scharfen Handlung ihre Präferenz für alle möglichen Handlungen durch eine Fuzzymenge ausdrücken [3]. Das Navigationsverhalten erwächst aus dem Zusammenspiel eines Hindernisvermeidungsverhaltens, eines Flurfolgeverhaltens, eines Zielpunktverhaltens und eines Türdurchfahrtverhaltens. Das Türdurchfahrtverhalten erkennt potentielle Kandidaten für geöffnete Türen anhand von Laserscans. Zunächst werden Scanpunkte zu durchgängigen Liniensegmenten verbunden. Eine Türhypothese wird generiert, wenn es möglich ist, eine rechteckige Box passender Breite und Tiefe überschneidungsfrei zwischen diesen Liniensegmenten zu plazieren. Eine besondere Schwierigkeit besteht darin, offene Türen unabhängig von der Anfahrtsrichtung des Roboters und dem Öffnungswinkel des Türblatts zu erkennen. Abbildung 2 zeigt im oberen Teil eine geschlossene Tür, die verworfen wird, da innerhalb der Kandidatenboxen zwischen den beiden äußeren Liniensegmenten zusätzliche Scanpunkte auftreten. Im unteren Teil wird die halb geöffnete Tür erkannt, da sich die Box überschneidungsfrei in den Scan einfügen lässt. Die Lage der Box bestimmt die Position eines sich verschiebenden Ansteuerungspunktes an welchen sich das Türdurchfahrtverhalten orientiert. Der Ansteuerungspunkt befindet sich auf der Mittelsenkrechten der Box und verlagert sich bei Annäherung des Roboters in Richtung der Tür. Dadurch beschreibt der Roboter bei der Türdurchfahrt eine bogenförmige Bahn zum Türmittelpunkt.

## Literatur:

- [1] David G. Lowe, "Distinctive image features from scale-invariant keypoints", *International Journal of Computer Vision*, 60, 2 (2004), Seite 91-110.
- [2] R.A. Brooks, "A robust layered control system for a mobile robot", *IEEE Journal of Robotics and Automation* (2), (1986), Seite 14-23
- [3] F. Hoffmann, "Fuzzy Behavior Coordination for Robot Learning from Demonstration", *NAFIPS 2004*, (2004), Band 1, Seite 157-162

# Optimale Pfadplanung aus fusionierten Videomerkmalen

C. Duchow, C. Stiller, S. Kammel, T. Dang, B. Hummel  
Institut für Mess- und Regelungstechnik  
Universität Karlsruhe (TH)  
{name}@mrt.uka.de

**Schlüsselwörter:** Stereosehen, stochastische Modellierung, Pfadplanung

Zum zweiten Mal veranstaltete die DARPA dieses Jahr ein Rennen („Grand Challenge 2005“) autonom geführter Fahrzeuge durch die Wüste Nevadas. Zusammen mit der Ohio State University (OSU) hat das Institut für Mess- und Regelungstechnik (MRT) der Universität Karlsruhe an diesem Rennen teilgenommen. Das dabei verwendete Auto vom Typ „Polaris Ranger“ war mit Ultraschall-Sensoren, 4 Laser-Scannern, GPS und dem am MRT entwickelten Stereo-Videosensor bestückt. Letzterer liefert, neben den 2½D-Daten der Fahrzeugumgebung, den bestmöglichen Pfad, auf dem das Gelände durchfahren werden kann. Bei der Endausscheidung fuhr das Fahrzeug mit der entwickelten Sensorik und Algorithmik eine Strecke von 47km vollautonom.

Nachfolgend werden die zur videobasierten Berechnung des optimalen Fahrwegs entwickelten Algorithmen kurz umrissen. Der vor dem Fahrzeug liegende Raum wird zunächst in rechteckige Regionen von der Größe der Fahrzeugfläche, erweitert um einen kleinen Pufferbereich, eingeteilt. Für jede der Regionen werden anschließend die Kosten dafür berechnet, dass es sich um einen befahrbaren Bereich oder ein Hindernis handelt. Dazu werden die Merkmale Disparitätenparallaxe, Texturhomogenität und Texturorientierung ausgewertet. Abschließend wird, ausgehend von der aktuellen Fahrzeugposition, diejenige zusammenhängende Sequenz von Regionen mit einer Baumsuche ermittelt, welche die Gesamtkosten für Hindernisse minimiert.

**Disparitätenparallaxe:** Aus dem von den Kameras erfassten Stereobildpaar wird im ersten Schritt ein Disparitätenbild berechnet und die darin vorherrschende Ebene mit dem Ansatz der v-Disparität bestimmt [1]. Die Parallaxe in jedem Bildpunkt ergibt sich aus der Differenz zwischen gemessener Disparität und Disparität der geschätzten Ebene an diesem Punkt. Bereiche mit geringer Parallaxe korrespondieren mit befahrbaren Bereichen wohingegen eine ausgeprägte Parallaxe auf ein Objekt oder eine Erhebung hinweist. Abbildung 1 zeigt das rechte Eingabebild, das Disparitätsfeld und eine in die Vogelperspektive umgerechnete Karte der Szene. Die detektierte Fahrbahnebene ist grau eingezeichnet.

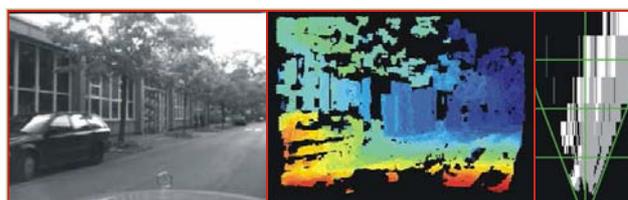


Abbildung 1: Bild, Disparität, Vogelperspektie

Der Kostenterm für die Disparitätenparallaxe berechnet sich durch quadrieren und aufsummieren der Parallaxenwerte innerhalb einer Region und anschließende Normierung mit der Maximalparallaxe und der Fläche der Region.

**Texturhomogenität:** Für Bereiche homogener Grauwerte lassen sich mit einer Stereobildauswertung prinzipbedingt keine Tiefeninformationen berechnen. Darum wird die Auswertung in diesen Bereichen zusätzlich durch eine texturbasierte Segmentierung in die Klassen Objekt und Fahrbahnebene gestützt.

Wegen der Vielzahl möglicher Texturen in unstrukturierten Umgebungen wird ein überwachter, d.h. mit Referenzmustern arbeitender, Klassifikationsalgorithmus eingesetzt. Die Startwerte stammen dabei aus vom Disparitätenschätzer zuverlässig zugeordneten Regionen. Ein Regionenwachstumsverfahren ordnet anschließend jedes Bildpixel der Klasse seines ähnlichsten Startpunkts zu. Das Ähnlichkeitsmaß berücksichtigt sowohl die Differenz des Medians der Grauwert-Intensitäten als auch die Distanz zwischen Pixel und Startpunkt.

Der Kostenterm für die Texturhomogenität ist der Anteil der als Hindernis klassifizierten Punkte an der Gesamtfläche der Region.

**Texturorientierung:** Als letztes Merkmal wird nun die lokale Orientierung beschrieben. Die Idee hinter diesem Ansatz ist, dass die zu suchende Piste Strukturen in Fahrtrichtung besitzt, also zum Beispiel Spurrillen oder Reifenabdrücke. Für die lokale Orientierung wird dann ein stochastisches Modell aufgestellt, welches die Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung der Orientierung beschreibt. Für Bildregionen, die einer Piste zuzuordnen sind wird dabei eine Mischung aus Gauß-Verteilung und Gleichverteilung angenommen, Bildbereiche, in denen keine Straße vorliegt, werden als Gleichverteilung alleine modelliert.

Über die Messung der Orientierung an einer Menge von Punkten in einem kleinen Bildbereich kann nun mit dem Satz von Bayes eine Aussage darüber getroffen werden, ob dieser Bildbereich wahrscheinlich zu einem Hindernis gehört. Diese Wahrscheinlichkeit bildet direkt den dritten Kostenterm. Abbildung 2 zeigt ein Eingabebild, die lokale Orientierung als rote Striche und rechts die Bildbereiche, die eine vorherrschende Orientierung von unten nach oben aufweisen.

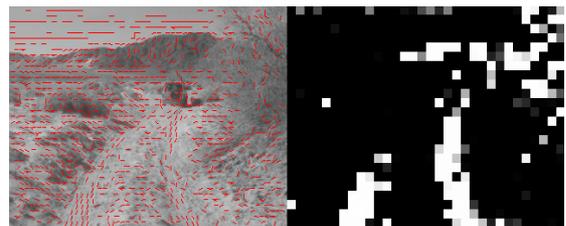


Abbildung 2: Lokale Orientierung

#### **Merkmalsbasierte Pfadberechnung:**

Die Gesamtkosten für die möglichen Pfade werden durch Aufsummieren der Kosten der Einzelmerkmale berechnet. Um grundsätzlich eher Pfade zu bevorzugen, die in Richtung des nächsten per GPS vorgegebenen Kontrollpunktes laufen, wird für davon abweichende Richtungen ein zusätzlicher Kostenterm proportional zur Winkelabweichung addiert. Ein Beispiel für einen Pfad, der an Hand der beschriebenen Methode berechnet wurde, ist in Abbildung 3 dargestellt.

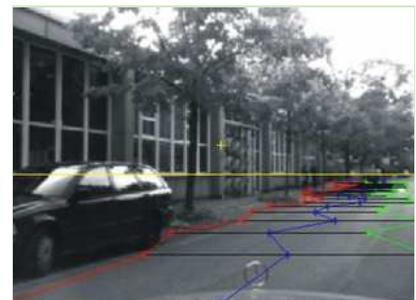


Abbildung 3: Pfad

#### **Literatur:**

[1] Labayrade, R., Aubert, D., Tarel, J.-P.: „Real time obstacle detection in stereovision on non flat road geometry through "v-disparity" representation", in: *Proc. IEEE Intelligent Vehicle Symposium*, Band 2, S. 646 – 651, 2002.

[2] Jähne, B.: „Digitale Bildverarbeitung“, 5. Auflage, Berlin, Springer, 2002

# Ereignisdiskrete Diagnose verteilter Systeme

Jörg Neidig \*

Jan Lunze \*\*

\* Automatisierungstechnik und Prozessinformatik  
Ruhr-Universität Bochum  
Universitätsstr. 150; 44780 Bochum  
Tel. 0234/32-26632  
Fax 0234/32-14101  
neidig@atp.rub.de

\*\* Automatisierungstechnik und Prozessinformatik  
Ruhr-Universität Bochum  
Universitätsstr. 150; 44780 Bochum  
Tel. 0234/32-24071  
Fax 0234/32-14101  
lunze@atp.rub.de

**Schlüsselwörter:** Diagnose, ereignisdiskrete Systeme, verteilte Systeme, Automatenetze

Die steigende Komplexität, erhöhte Verfügbarkeitserwartungen und gesetzlichen Vorschriften fordern in immer mehr technischen Anlagen den Einsatz von Diagnosesystemen. Die Aufgabe dieser Systeme ist das rechtzeitige und selbsttätige Erkennen von Fehlern und deren mögliche Ursachen, um Schäden an Mensch, Maschine und Umwelt zu vermeiden. Dieser Beitrag befasst sich mit der modellbasierten Diagnose technischer Systeme, die durch Automatenetze beschrieben sind.

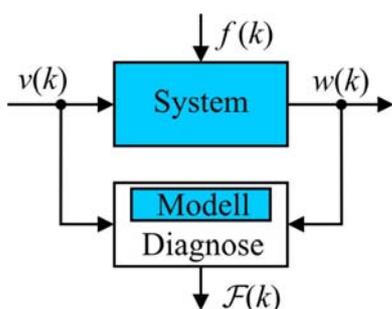


Abbildung 1: Aufbau der modellbasierten Diagnose

Das Grundprinzip der modellbasierten Diagnose ist in Abb. 1 veranschaulicht. Der Diagnosealgorithmus prüft die Konsistenz der gemessenen Eingangs- und Ausgangsfolgen mit Modellen des fehlerfreien bzw. fehlerbehafteten Systems und schließt aus Inkonsistenzen auf das Vorhandensein von Fehlern.

Als eine mögliche ereignisdiskrete Modellform wurde in der Vergangenheit der Zustandsautomat genutzt, da er sich unter anderem durch einfache Handhabung und Realisierung auszeichnet [1]. Die Diagnose mittels Automaten wurde bereits mehrfach erfolgreich an unterschiedlichen industriellen Anlagen eingesetzt [2,3].

Automaten haben jedoch, wie alle ereignisdiskreten Modellformen, den Nachteil, dass sie unter der kombinatorischen Explosion leiden. D.h. bei zunehmender Anzahl von Signalen wird das Modell schnell so groß, dass es nicht mehr für die Diagnoseaufgabe unter Echtzeitbedingungen eingesetzt werden kann. Methoden zur Komplexitätsreduktion zu erarbeiten, ist deshalb eine wichtige Forschungsaufgabe auf dem Gebiet der Diagnose ereignisdiskreter Systeme. In diesem Beitrag wird dazu die Verwendung von Automatenetzen vorgestellt. Dabei wird jede Komponente des Systems getrennt durch einen Automaten modelliert und diese miteinander durch entsprechende Signale verkoppelt, was zu einer deutlichen Reduktion der Modellgröße im Vergleich zu einem monolithischen Modell führt.

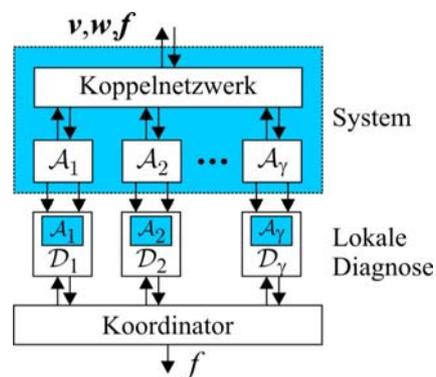


Abbildung 2: Ansatz der koordinierten Diagnose

Um den Vorteil der verteilten Modellform vollständig nutzen zu können, muss auch das Diagnosesystem eine verteilte Struktur aufweisen [4]. Es wird gezeigt, dass die

Diagnose nichtdeterministischer Automatenetze immer in mehrere kleine unabhängige Diagnoseaufgaben unterteilt werden kann. Dabei ist jede Diagnoseeinheit allein für die Überwachung einer Komponente des Netzwerks verantwortlich und verfügt dabei nur über das Modell und die gemessenen Signale dieser Komponente. Das restliche Netzwerk ist unbekannt. Dieser Ansatz zeichnet sich durch eine verbesserte Skalierbarkeit, Ausfallsicherheit und Wiederverwendbarkeit aus. Auf Grund der eingeschränkten Information erreicht das Diagnoseergebnis des verteilten Ansatzes jedoch im Regelfall nicht die Güte eines vergleichbaren monolithischen Ansatzes, welcher über das vollständige Systemmodell und sämtliche Messungen verfügt. Je nach Realisierung kommt es dadurch zu vermehrten Fehlalarmen oder nicht detektierten Fehlern an der Anlage.

Zu einer wesentlich besseren Lösung kommt man, indem die Diagnoseergebnisse des verteilten Ansatzes durch eine nachgeschaltete Einheit, einen so genannten Koordinator, zum Gesamtergebnis kombiniert werden (Abb. 2). Der Koordinator verfügt über keinerlei dynamisches Modell des Systems und benötigt daher in der Realisierung nur geringen Speicherplatz. Stattdessen erhält er die Ergebnisse der unabhängigen lokalen Diagnoseeinheiten und untersucht diese auf Widersprüche. Interessanterweise kann gezeigt werden, dass, unabhängig von der Struktur des Netzwerks und der zur Verfügung stehenden Information, der „koordinierte“ Ansatz zu dem gleichen Ergebnis führt wie ein vergleichbarer zentralisierter Ansatz [5]. Durch die Nutzung der Struktur des Netzwerks kann demnach die Güte der monolithischen Diagnose beibehalten werden, bei deutlich reduziertem Rechenaufwand. Grundlage dieser Methode ist eine relationale Darstellung der Diagnoseergebnisse.

Erprobt wird der Diagnoseansatz an einer verfahrenstechnischen Anlage, die seit 2004 am Lehrstuhl für Automatisierungstechnik und Prozessinformatik in Bochum aufgebaut ist (Abb. 3). Beim Bau der Anlage wurde auf eine möglichst industriennahe Realisierung geachtet. Die Komplexität des Aufbaus ist deutlich zu groß, um einen monolithischen Diagnoseansatz ansatzweise umsetzen zu können. Dadurch wird noch einmal die Notwendigkeit von Methoden zur verteilten Diagnose verdeutlicht.

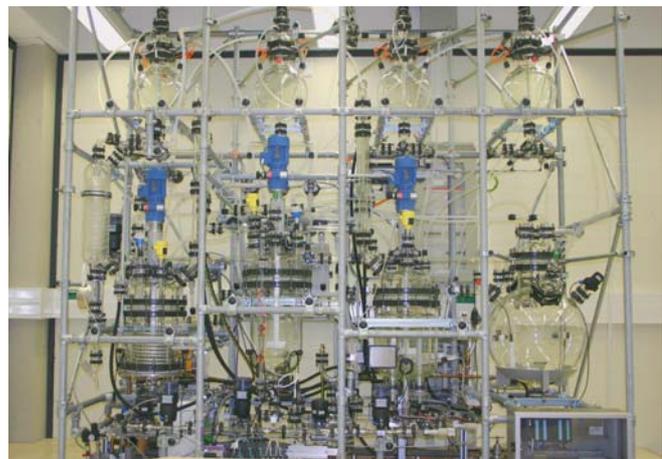


Abbildung 3: Verfahrenstechnische Anlage

## Literatur:

- [1] M. BLANKE, M. KINNAERT, J. LUNZE, M. STAROSWIECKI: *Diagnosis and Fault-Tolerant Control*. Springer-Verlag Berlin, 2003
- [2] J. SCHRÖDER: *Modelling, State Observation and Diagnosis of Quantised Systems*. Springer-Verlag Berlin, 2003.
- [3] J. NEIDIG, C. FALKENBERG, J. LUNZE, M. FRITZ: Qualitative Diagnosis of an Automotive Air Path. *ATPi*, 3(1):pp. 37-42, 2005.
- [4] J. NEIDIG, J. LUNZE: Decentralised Diagnosis of Automata Networks. *Proceedings of the 16th IFAC World Congress*, Prague, 2005.
- [5] J. NEIDIG, J. LUNZE: Coordinated Diagnosis of Nondeterministic Automata Networks. *17th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems*, Kyoto (Japan), 2006, eingereicht.

# Hybride Regelung durch qualitative Vorselektion

Wolfgang Kleißl

Institut für Regelungs- und Automatisierungstechnik  
Technische Universität Graz  
Inffeldgasse 16c, A-8010 Graz  
Wolfgang.Kleissl@TUGraz.at

**Schlüsselwörter:** hybride Systeme, qualitative Methoden

Viele komplexe technische Systeme lassen sich nicht in allen Betriebszuständen durch einen einzelnen, global gültigen Satz von Differential- oder Differenzgleichungen gut beschreiben. Es ist oft vorteilhafter, für diese Betriebszustände (modes) jeweils ein eigenes Modell zu ermitteln. So kann das Verhalten des Gesamtsystems charakterisiert werden, indem ein zusätzliches *diskretes* Modell (z.B. ein Automat) die Übergänge zwischen den Betriebszuständen beschreibt und damit festlegt, welches *kontinuierliche* Verhalten das System gerade zeigt.

Wir konzentrieren uns dazu auf eine Klasse hybrider Systeme, die sich vereinfacht wie folgt darstellen lässt: Im Sinn einer zeitdiskreten online Regelung wird das Verhalten des Systems innerhalb eines modes  $x_d = m_i$  durch ein Modell, das aus linearen Differenzgleichungen der Form

$$\begin{aligned}\mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}_i \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_i \mathbf{u}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}_i \mathbf{x}_k + \mathbf{D}_i \mathbf{u}_k\end{aligned}\quad (1)$$

besteht, beschrieben. Zu jedem Zeitpunkt  $t_k = t_0 + kT_s$  ist zudem eine Änderung des modes möglich. Diese erfolgt genau dann, wenn der zugehörige sogenannte *guard*  $c_j = f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k, u_{dk})$  erfüllt ist. Letzterer entspricht einer logischen Bedingung aus affinen Ungleichungen in  $\mathbf{x}_k$  und  $\mathbf{u}_k$  sowie logischen Beziehungen für die Kommandoingänge  $u_{dk}$ .

Die Regelungsaufgabe besteht darin, das hybride Systemverhalten innerhalb eines Horizonts von  $N$  Schritten möglichst einem Referenzverhalten  $(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*)$  anzupassen.

$$\min \left( \sum_{i=1}^N \mathbf{e}_{x,i}^T \mathbf{Q}_i \mathbf{e}_{x,i} + \mathbf{e}_{u,i}^T \mathbf{R}_i \mathbf{e}_{u,i} \right) \quad \text{mit } \mathbf{e}_{x,i} := \mathbf{x}_{k+i} - \mathbf{x}_{k+i}^* \quad \mathbf{e}_{u,i} := \mathbf{u}_{k-1+i} - \mathbf{u}_{k-1+i}^* \quad (2)$$

Die Aufgabe wird durch die Interaktion zwischen kontinuierlichem Verhalten und diskreten mode-Übergängen erschwert, da *kontinuierliche*  $(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)$  und *diskretwertige*  $(x_{dk}, u_{dk})$  Variable simultan betrachtet werden müssen. Ein intuitiver Ansatz zur Umgehung dieses Problems ist, für jede mögliche Kombination von Werten der diskreten Variablen die Regelungsaufgabe zu lösen und sich dann für die *beste* Lösung zu entscheiden. Dieser Weg ist aufgrund der extrem hohen Anzahl möglicher diskreter Wertzuweisungen im allgemeinen nicht realisierbar. Es erscheint sinnvoll, sich schnell auf sehr *wenige* – doch *vielversprechende* – Möglichkeiten zu konzentrieren, um eine „gute“ Lösung der hybriden Regelungsaufgabe zu erhalten.

Dazu bedienen wir uns zunächst einer vereinfachenden qualitativen Abstraktion [1] des hybriden Systemverhaltens. Hierzu wird die komplizierte hybride Regelungsaufgabe so umformuliert, dass sie (zumindest auf qualitativer Ebene) sehr effizient durch eine Pfad-Suche in einem Graphen gelöst werden kann. Diese qualitative Lösung dient dann als Vorselektion einer mode-Sequenz für einen verfeinernden numerischen Reglerentwurf.

Zur qualitativen Abstraktion des Systems teilen wir zunächst die Wertebereiche der kontinuierlichen Variablen in qualitative Regionen und abstrahieren z.B. Trajektorien, die von einer solchen Region des abstrahierten Zustandsraumes  $X$  (z.B.  $X_k = \xi_1$ ) im mode  $x_{d,k+1} = m_1$  in einem Abtastschritt in eine bestimmte Region ( $X_{k+1} = \xi_3$ ) laufen, als logische Beziehung

$$X_k = \xi_1 \wedge x_{d,k+1} = m_1 \wedge X_{k+1} = \xi_3 \quad (3)$$

Im allgemeinen erreichen aber nicht alle Trajektorien aus einer Region dasselbe Zielgebiet. Das lösen wir teilweise, indem wir die qualitativen Abstraktionen der Trajektorien in verschiedene Wahrscheinlichkeitsklassen einordnen, denen wir Kostenwerte  $C_L$  zuordnen.

Um eine effiziente Auswertung zu ermöglichen, wählen wir zudem eine spezielle Darstellung dieser logischen Beziehungen als Graph [1], der einem *Binary-Decision-Diagramm* [2] ähnlich ist. Dieser bildet alle möglichen hybriden Trajektorien (inklusive der Kosten) für einen Abtastschritt als Pfade vom Wurzelknoten des Graphen zu den Endknoten kompakt ab. Trajektorien für längere Zeitabschnitte lassen sich durch mehrfache Verwendung desselben Graphen bilden. Im Weiteren ist dem Graphen eine an eine kausale Analyse des Systems angelehnte Variablenordnung zugrundegelegt, die es erlaubt, qualitative Trajektorien effizient zu vergleichen und nur gute weiterzuverfolgen.

Mit diesem vorkompilierten, abstrahierten Modell soll nun online die Regelungsaufgabe auf qualitativer Ebene gelöst werden. Es sollen also „gute“ Werte für die qualitativen Variablen  $X_k, U_k, x_{d,k+1}, X_{k+1}, \dots$  gefunden werden. Zum einen sind das Werte, die kleine Beiträge zur Gütefunktion (2) ermöglichen. Jedem qualitativen Wert wird daher ein Kostenwert  $C_R$  zugeordnet, der dem innerhalb der qualitativen Region minimalen Beitrag zu (2) entspricht. Zum anderen sollen Trajektorien aber auch nicht aus „sehr unwahrscheinlichen“ Teilen zusammengesetzt sein, da sonst erhöhte Gefahr besteht, dass es sich um ein *spurious behavior* [3] handelt. Dieses entspricht keiner Trajektorie des hybriden Systems. Als Optimierungskriterium für die qualitative Suche verwenden wir daher eine gewichtete Kombination aus „Referenzwertkosten“  $C_R$  und „Wahrscheinlichkeitskosten“  $C_L$ :

$$\min(w_R \sum C_R + w_L \sum C_L). \quad (4)$$

Die resultierende qualitativ beste Trajektorie spezifiziert alle diskretwertigen Variablen des hybriden Modells und legt damit die mode-Sequenz fest. Das hybride System mit spezifizierter mode-Sequenz kann nun als „gewöhnliches“ zeitvariables System betrachtet werden. Daraufhin werden Standardmethoden wie Predictive Control eingesetzt, um die bislang erst auf qualitative Regionen bestimmten kontinuierlichen Stellgrößen weiter zu spezifizieren. Zudem werden auf diese Art *spurious behaviors* endgültig erkannt und verworfen. Die Suche nach der qualitativ nächstbesten Trajektorie wird fortgesetzt, bis eine korrekte Lösung gefunden ist.

Auf diese Weise kann durch effiziente qualitative Vorselektion (Pfad-Suche) die hybride Regelungsaufgabe rasch auf vielversprechende mode-Sequenzen hingeleitet werden. Der mit hohem Rechenaufwand verbundene numerische Entwurf braucht nur zur endgültigen Spezifikation der kontinuierlichen Variablen durchgeführt zu werden.

### Literatur:

- [1] W. Kleissl, M.W. Hofbaur, A Qualitative Model for Hybrid Control, Proceedings of QR05, (2005), 8–16
- [2] H. Anderson, An Introduction to Binary Decision Diagrams, Lecture Notes for 49285 Advanced Algorithms E97, Technical University of Denmark (1997)
- [3] B. Kuipers, Qualitative Simulation, MIT Press, Cambridge MA (1994)

# Eine Prozessführungsstrategie für zeitdiskrete stückweise affine Systeme

\*Thomas Erhard Hodrus

\*\*Volker Krebs

\*Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme  
 Universität Karlsruhe (TH)  
 Tel.:0721/608-2462  
 Fax.:0721/608-2707  
 hodrus@irs.uni-karlsruhe.de

\*\*Institut für Regelungs- und Steuerungssysteme  
 Universität Karlsruhe (TH)  
 Tel.:0721/608-3180  
 Fax.:0721/608-2707  
 krebs@irs.uni-karlsruhe.de

**Schlüsselwörter:** Hybride Systeme, stückweise affine Systeme, zeitdiskrete Systeme, Prozessführungsstrategie, Stellgrößenvorgabe

Stückweise affine Systeme, die zur Klasse der hybriden Systeme gezählt werden können, haben in der jüngsten Vergangenheit viel Aufmerksamkeit auf sich gezogen, da es mit ihrer Hilfe gelingt, auch komplexere Prozesse wie den in diesem Beitrag behandelten losebehafteten Antriebsstrang eines Kraftfahrzeugs zu modellieren und als Basis für eine Prozessführungsstrategie zu verwenden. Die technische Realisierung dieser Regelung auf einem Mikroprozessor motiviert und fordert darüber hinaus die Interpretation als zeitdiskrete stückweise affine Systeme.

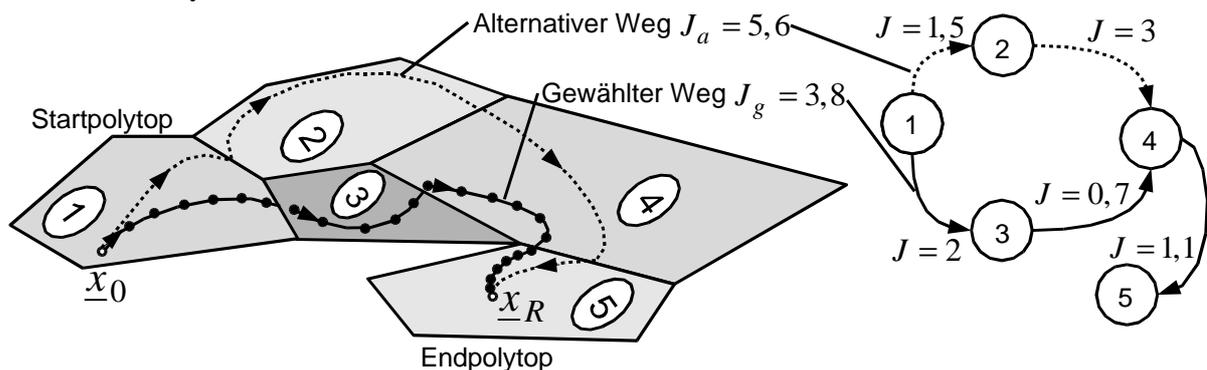


Abbildung 1: Stückweise affines System in Polytopstruktur und daraus abgeleiteter Graph

Die Prozessführungsstrategie wird entsprechend Abbildung 1 entwickelt. Dazu ist der (hier zweidimensionale) Zustandsraum in Polytope aufgeteilt. In jedem Polytop gilt jeweils eine spezielle affine Dynamik. Nimmt man an, dass der aktuelle Systemzustand den Startzustand  $\underline{x}_0$  der zu untersuchenden Trajektorie darstellt, der gewünschte Endzustand  $\underline{x}_R$  aber im Endpolytop liegt, so muss eine Trajektorie vom Startpolytop zum Endpolytop gefunden werden. Nach dem Verlassen des Polytops (1) befindet sich der Zustand im Nachbarpolytop und kann dann als neuer Startzustand interpretiert werden. Wird nun durch sequenzielles Anwenden dieser Vorgehensweise das Polytop erreicht, in dem der Endzustand liegt, dann muss die Trajektorie im Endpolytop schließlich noch in die Ruhelage überführt werden.

Die vorgestellte Prozessführungsstrategie gliedert sich folglich in einen globalen und in einen lokalen Anteil. Der lokale Anteil bezeichnet den Entwurf von Regelungen, die die Trajektorie zum Verlassen eines Polytops veranlassen oder im Endpolytop in eine Ruhelage überführen. Der globale Anteil bezeichnet die Wegsuche in der zur Koordinierung dieser Regelungen entworfenen Graphenstruktur.

Zuerst wird jedem Polytop in Abbildung 1 ein Knoten in einem gerichteten Graphen zugeordnet. Der lokale Anteil der Prozessführungsstrategie bestimmt nun für jede mögliche Seite

des Polytops eine Regelung derart, dass mögliche Trajektorien das Polytop nur über die gewählte Austrittsseite verlassen können. Gelingt dieses Vorhaben, wird eine gerichtete Kante ausgehend von dem Knoten, der das aktuellen Polytop repräsentiert, hin zu dem Knoten gezeichnet, der das Nachbarypolytop darstellt. Bezüglich eines Gütemaßes wird eine Bewertung der gefundenen Regelung für die jeweilige Seite angegeben und der gerichteten Kante im Graphen zugeordnet.

Der globale Anteil beschränkt sich auf die Suche des Weges mit dem minimalen Gütemaß vom Anfangsknoten zum Endknoten im Graphen. Ist ein Weg gefunden, dann ist damit auch klar, welche Regelung in den einzelnen Polytopen eingesetzt werden muss. In Abbildung 1 ist der optimale *gewählte Weg* und ein möglicher *alternativer Weg* skizziert, der aber aufgrund des größeren Gesamtgütemaßes  $J_a > J_g$  nicht zur Anwendung kommt. Im Endpolytop ist dann eine Regelung für das Einnehmen der gewünschten Ruhelage zu finden.

Für den Entwurf der Regelungen, basierend auf zeitdiskreten Zustandsraummodellen, wurden in [1] und [2] neue Konzepte vorgestellt. Sie sind eine Weiterentwicklung der Verfahren in [3] und [4], welche für kontinuierliche hybride Systeme angegeben wurden. Die Beschreibung zeitdiskreter hybrider Systeme stellt eine besondere Herausforderung dar, da nur zu den Abtastzeiten bekannt ist, wo sich der aktuelle Zustand befindet. In [1] werden Bedingungen an die zeitdiskrete Änderung des Zustands, ausgehend von einer Polytopecke, formuliert, die nur von der Stellgröße in der jeweiligen Ecke abhängen. Können diese Bedingungen in allen Ecken eingehalten werden, kann durch eine Matrixinversion das Regelgesetz berechnet werden. In [2] werden Systemgrenzen des geregelten Systems zum Regelungsentwurf genutzt. Beide Verfahren sind sowohl für den gezielten Übertritt über eine Austrittsseite als auch für die Regelung im Endpolytop geeignet.

Bei der Anwendung der Prozessführungsstrategie muss jetzt nur noch festgestellt werden, in welchem Polytop sich der aktuelle Zustand befindet, um den richtigen Regler aufzuschalten.

Mit der vorgestellten Prozessführungsstrategie wird gezeigt, wie eine global optimale hierarchische Regelung für zeitdiskrete stückweise affine Systeme effizient realisiert werden kann. Die gefundene Lösung erfüllt dabei in zweierlei Hinsicht Optimalitätsbedingungen. Zum einen liefert der globale Anteil der Prozessführung die optimale Sequenz von Polytopen, zum anderen werden Freiheitsgrade beim lokalen Anteil der Prozessführungsstrategie so gewählt, dass die Trajektorie bezüglich des gewählten Gütemaßes optimal ist. Für die Übertrittsregelung wie auch für die Endgebietsregelung kann so z.B. die Geschwindigkeit, mit der die Trajektorie das Polytop verlässt bzw. auf die Ruhelage strebt, maximiert werden.

## Literatur:

- [1] Hodrus, Thomas Erhard; Buchholz, Michael; Krebs, Volker: *A New Local Control Strategy for Control of Discrete-Time Piecewise Affine Systems*. Erscheint in Proceedings of European Control Conference (ECC), Sevilla, Spanien, 2005.
- [2] Hodrus, Thomas Erhard; Buchholz, Michael; Krebs, Volker: *Control of Discrete-Time Piecewise Affine Systems*. In Proceedings of IFAC Worldcongress, Prag, 2005.
- [3] Habets, Luc C. G. J. M.; van Schuppen, Jan H.: *A Control Problem for Affine Dynamical Systems on a Full-Dimensional Polytope*. Automatica, (40):21-35, 2004.
- [4] Nenninger, Gero Michael: *Modellbildung und Analyse hybrider dynamischer Systeme als Grundlage für den Entwurf hybrider Steuerungen*. In: Fortschritt-Berichte VDI, Band 902 der Reihe 8. VDI Verlag GmbH. Düsseldorf, 2001.

# Automatisiertes Engineering von Prozessleitsystemen

Dipl.-Ing. Till Schmidberger

Institut für Automatisierungstechnik  
Helmut-Schmidt-Universität /  
Universität der Bundeswehr Hamburg  
Holstenhofweg 85  
22043 Hamburg  
+49 (0)40 6541 2741  
+49 (0)40 6541 2004  
till.schmidberger@hsu-hh.de

Prof. Dr.-Ing. Alexander Fay

Institut für Automatisierungstechnik  
Helmut-Schmidt-Universität /  
Universität der Bundeswehr Hamburg  
Holstenhofweg 85  
22043 Hamburg  
+49 (0)40 6541 2719  
+49 (0)40 6541 2004  
alexander.fay@hsu-hh.de

**Schlüsselwörter:** Automatisierung / Verriegelungssteuerungen / Prozessleitsystem / Engineering / wissensbasiertes System / regelbasiertes System

Um dem Anstieg der Engineeringkosten für Planung und Implementierung von Prozessleitsystem-Applikationen entgegen zu wirken, muss eine Effizienzsteigerung der verwendeten Engineering-Methoden erzielt werden. In [Ens02] und [Uec05] wird für diese Effizienzsteigerung die „Automatisierung der Automatisierung“ angeregt und als Begriff geprägt. Automatismen sollen Teilaufgaben von zeitaufwendigen, manuellen Engineering-Aufgaben ausführen. Der Mehrwert besteht dabei darin, mit reduziertem Arbeitsaufwand gleichbleibend hohe Qualität bzgl. der gewünschten leittechnischen Funktionalität zu erzielen. Grundvoraussetzung für die Automatisierung von Engineering-Aufgaben ist die Verfügbarkeit der erforderlichen Anlageninformationen in einem elektronischen Datenformat, das durch Rechnersysteme ausgewertet und interpretiert werden kann. Hiermit es möglich, ein wissensbasiertes System aufzubauen, welches automatisch Anlageninformationen auswertet und interpretiert.

Im Gegensatz zu früheren CAE-Programmen für das Engineering von verfahrenstechnischen Anlagen, welche Informationen oftmals nur Form von Zeichnungen enthielten, sind moderne CAE-Werkzeuge objektorientiert aufgebaut und erlauben einen rechnergestützten, automatisierten Zugriff auf die vorhandenen Engineering-Objekte, deren Attribute, und der sie verbindenden Relationen [DIN04].

Neben dieser Faktenbasis ist für das automatisierte, wissensbasierte Engineering eine Wissensbasis notwendig. Diese Wissensbasis enthält Zusammenhänge zwischen bestimmten, typischen Strukturen in verfahrenstechnischen Anlagen und den dafür geeigneten bzw. erforderlichen automatisierungstechnischen Lösungen. Diese Vorschriften können als Regeln formuliert werden. Diese Regeln basieren auf dem Wissen von Prozessleittechnik-Experten, welches oftmals bereits in schriftlicher Form vorliegt (siehe beispielsweise in [Sch05] für Pumpen). Diese Regeln müssen lediglich in ein Format umgewandelt werden, welches vom Rechner auf die jeweiligen Anlagendaten angewandt werden kann.

Das hier vorgestellte wissensbasierte System geht, wie in Abbildung 1 schematisch dargestellt, in zwei Hauptschritten vor: Im ersten Schritt werden in den Anlagen-Struktur-Informationen typische Muster erkannt, im zweiten Schritt werden auf die erkannten Muster

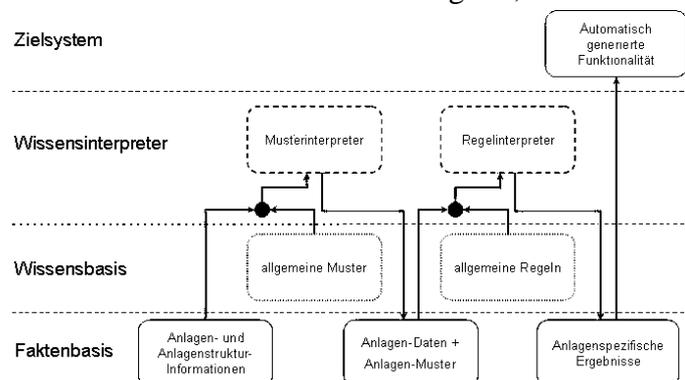


Abbildung 1: wissensbasierte Auswertung von Anlageninformationen

passende Regeln angewandt. Die so gewonnenen allgemein gültigen Ergebnisse sind dann für das jeweilige Prozessleitsystem systemspezifisch in eine Implementierung umzusetzen.

Das Vorgehen soll am Beispiel dient eine Verriegelungslogik, die alle offenen Behälter einer Anlage vor dem Überlaufen schützen soll. Die dafür allgemein gültige Regel kann im „Wenn ... Dann ...“ – Formalismus ausgedrückt werden und lautet vereinfacht: „Wenn der Behälter voll ist, dann schließe den Zulauf“. Im 1. Schritt ist dafür die komplette Anlagenschreibung nach Komponenten-Zusammensetzungen zu durchsuchen, die das allgemeine Muster „Ventil im Zulauf eines Behälters mit Füllstandsmessung“ erfüllen (wobei sowohl Messung als auch Stellung über das Leitsystem erfolgen müssen). Wird ein solches Muster gefunden, kann im 2. Schritt die zuvor definierte Regel angewendet werden, die besagt: „Wenn diese Situation vorliegt, dann implementiere im Leitsystem eine Verriegelung, die den Füllstand mit dem oberen Grenzwert vergleicht und bei Überschreiten das Ventil schließt und einen Alarm auslöst“. Die systemspezifische Umsetzung kann z.B. in ein Funktionsbausteindiagramm (siehe Abbildung 2) erfolgen.

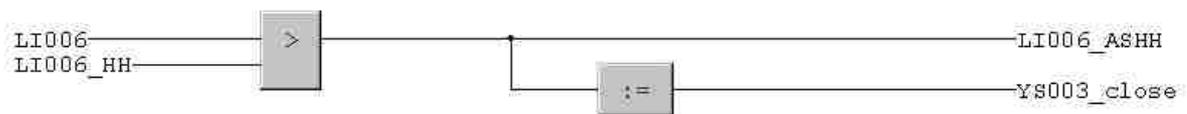


Abbildung 2: automatisch erstellte Verriegelungssteuerung

Der hier am Beispiel von Verriegelungssteuerungen dargestellte regelbasierte Ansatz kann für vielfältige andere Automatisierungstechnik-Engineering-Aufgaben eingesetzt werden. Die im ersten Schritt erkannten Muster können dabei für verschiedene Zwecke interpretiert werden. Zum Beispiel kann auf das oben gefundene Muster eines Behälters mit Zulauf und Füllstandssensor folgende Fehlerüberwachungsregel angewandt werden: „Wenn der Zulauf verschlossen ist und der Füllstand im Behälter steigt dann liegt ein Fehler vor.“ Dieses Ergebnis kann dann systemspezifisch in einem Prozessleitsystem oder einem Asset Management System implementiert werden, wodurch auch der Engineering-Aufwand für Asset-Mangement-Anwendungen reduziert werden kann.

## Literatur:

- [Uec05] Uecker, F.G.: Konzept zur Prozessdatenvalidierung für die Prozessleittechnik. VDI Fortschritts-Berichte Reihe 8 Nr. 1075. Düsseldorf: VDI Verlag 2005. ISBN: 3-18-507508-0
- [Ens02] Enste, U.: Automation der Automation: Systemunabhängige und konfigurationslose Anwendungen entwickeln mit ACPLT-Technologie. Process (10-2002), S. 90-92.
- [Sch05] Schicketanz, W.: Regelung und Absicherung von Systemen mit Strömungspumpen in der chemischen Industrie. atp 47 (2005) Heft 3, S. 51-65
- [DIN04] DIN V 44366: Festlegung für die Darstellung von Aufgaben der Prozessleittechnik in Fließbildern und für den Datenaustausch zwischen EDV-Werkzeugen zur Fließbild-Erstellung und CAE-Systemen. Beuth Verlag, Berlin (2004)

# Vortragskurzfassung

Dipl.-Ing. Ingo Wagner

IMAT - FG Systemtechnik und Mensch-Maschine Systeme  
Universität Kassel  
Mönchebergstr. 7  
Tel. 0561/804-2704  
Fax 0561/804-3542  
Email I.Wagner@Uni-Kassel.de

**Schlüsselwörter:** Qualitätssicherung, Expertenbefragung, Fuzzy-Logik/Systemtechnik-Lernsysteme, E-Learning.

## Qualitätssicherung von Lernsystemen in der Systemtechnik-Lehre

Neben dem Angebot von Präsenzveranstaltungen bietet es sich an Hochschulen an, die neuen Medien gezielt für interaktive und multimediale Vermittlungsaufgaben in der Lehre zu nutzen. Die Entwicklung passender Lernsysteme wird von Universitäten bereits energisch vorangetrieben. Doch nicht alle Lernsysteme überzeugen im universitären Einsatz.

Zur Qualitätssicherung von Lernsystemen existieren eine Reihe von Evaluationsinstrumenten, die eine Bewertung der Qualität ermöglichen sollen. Eine weite Verbreitung haben Qualitätskriterienkataloge gefunden. Diese enthalten in der Regel Fragen zu relevanten Qualitätsaspekten eines Lernsystems. Aus den Antworten der Befragten lassen sich Rückschlüsse auf die Qualität des untersuchten Lernsystems ziehen.

Doch die am Markt befindlichen konkurrierenden Qualitätskriterienkataloge sind in der Regel entweder nicht aktuell, unflexibel, d.h. auf einen Lernsystemtyp spezialisiert, oder die Qualitätskriterien sind so global und missverständlich formuliert, dass sie wenig effizient sind. Weiterhin fehlen nicht selten computergestützte Werkzeuge, die eine leichte Handhabung durchzuführender Evaluationen garantieren.

Im Fachgebiet Systemtechnik und Mensch-Maschine-Systeme wird ein von den üblichen Qualitätskriterienkatalogen abweichendes Konzept entwickelt. Damit das Potenzial von Lernsystemen in Lehr- und Lernprozessen richtig genutzt wird, bedarf es einer Qualitätssicherung, die nicht nur einmalig am Ende einer Projektlaufzeit stattfindet. Wirtschaftlicher sind formative, also entwicklungsbegleitende, Prototyp-Evaluationen, um Mängel eines Prototyps frühzeitig zu erkennen und rechtzeitig zu beseitigen. Eine fest installierte zyklische Qualitätssicherung für den gesamten Entwicklungsprozess eines Lernsystems ist unverzichtbar.

Die Qualitätssicherung besteht im wesentlichen aus zwei Wirkungskreisen, durch die die Qualität des Lernsystems überprüft wird. Der erste Wirkungskreis entspricht einer formativen Evaluation, der zweite Wirkungskreis sieht eine summative Produkt-Evaluation vor, also einen Benutzertest zum vollständig entwickelten Lernsystem.

Die formative Prototyp-Evaluation wird durch eine Befragung projektexterner Experten anhand eines webbasierten Qualitätskriterienkatalogs realisiert. Die Durchführung von Exper-

tenbefragungen gilt allgemein als recht aufwändig. Die Generierung von Fragen und Fragebögen und die Rekrutierung von Experten kosten in der Regel Zeit.

Die hier vorgestellte Qualitätssicherung begegnet diesem Problem durch eine besondere Befragungstechnik und einem webbasierten Werkzeug zur Entwicklung, Organisation und Auswertung von Befragungen. Den Bewertern steht eine umfangreiche Wissensbasis zur Verfügung, die es ermöglicht, hinter die Fragestellungen der Qualitätskriterien zu schauen und sich fehlendes Wissen bei Bedarf anzueignen.

Drei Lernsysteme zur Fuzzy-Logik und zwei zur Systemtechnik wurden mit dem Qualitätskriterienkatalog analysiert. Die bisher durchgeführten Untersuchungen decken das Potenzial von qualitätskriterienbasierten Expertenbefragungen auf und zeigen, dass die Qualitätssicherung als selbstverständlicher Bestandteil des Entwicklungszyklus - von der Idee bis zum Einsatz von Lernsystemen - integriert werden kann.

# Testdatenermittlung für eingebettete Automatisierungssoftware auf Grundlage hybrider Modelle

Paul Linder

Institut für Automatisierungs- und Softwaretechnik  
Universität Stuttgart  
Pfaffenwaldring 47  
Tel.: +49 711 685 7305  
Fax: +49 711 685 7302  
E-Mail: linder@ias.uni-stuttgart.de

**Schlüsselwörter:** modellbasiertes Testen, eingebettete Automatisierungssoftware, Constraints

Die modellbasierte Softwareentwicklung für eingebettete Automatisierungssysteme mithilfe von Simulations- und Codegenerierungswerkzeugen wie Matlab/Simulink oder ASCET-SD ermöglicht dynamische Prüfungen bereits in frühen Entwicklungsphasen, wie beispielsweise das Testen von Funktionsmodellen in der Simulation oder das Rapid-Prototyping von Softwarefunktionen durch Co-Simulation mit einem realen Prozess. Die Ermittlung der hierzu erforderlichen Simulations- und Testszenarien erfolgt dabei vorwiegend intuitiv, unterstützt durch Methoden des Blackbox-Testens und funktionaler Überdeckungsheuristiken (vgl. [1]). Die Herausforderung liegt in der Ermittlung qualitativ hochwertiger Testdaten, welche auf effiziente Weise eine möglichst umfassende Testabdeckung und damit Fehlerrückmeldung bewirken.

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit einem neuen Verfahren zur rechnerunterstützten, automatisierten Ermittlung von Testszenarien [2] durch Auswertung der Modellinformation heterogener, hybrider Signalflusspläne, welche üblicherweise zur Modellierung eingesetzt werden. Kern des Verfahrens ist die mathematische Ermittlung von Testdaten mithilfe von Constraints [3], welche auf präzise Weise Testabdeckungs- bzw. Modellüberdeckungsanforderungen beschreiben und somit eine eindeutige Bewertung von Testdaten ermöglichen. Die Constraints werden auf Basis von Mutationsbetrachtungen aus der Modellstruktur der betrachteten Signalflusspläne gewonnen, wobei sowohl kontinuierliche Elemente, wie beispielsweise Integratoren, als auch diskrete Elemente, wie beispielsweise logische Verknüpfungen oder Automaten, berücksichtigt werden. Neben einer rechnerunterstützten Analyse der Güte bzw. Testabdeckung vorliegender Testdaten, ermöglicht das Verfahren auch eine Generierung neuer Testdaten einer qualitativ hohen, klar definierten Güte durch rechnerunterstütztes Lösen der Constraints mittels iterativer Algorithmen.

## Literatur:

- [1] H. Schlingloff, M. Conrad, H. Dörr, C. Sühl: Modellbasierte Steuergeräteentwicklung für den Automobilbereich. Automotive - Safety & Security 2004, Stuttgart, 2004.
- [2] P. Linder: Ein Verfahren zur rechnerunterstützten modellbasierten Testdatensynthese für eingebettete Automatisierungssoftware. Kolloquium Testen im System- und Software-Life-Cycle, Ostfildern, 2005.
- [3] R. Barták: Constraint Programming: In Pursuit of the Holy Grail. Proc. of Week of Doctoral Students, Prague, 1999.

# Analyse von CRC-Polynomen für die sicherheitskritische Kommunikation mittels deterministischer und stochastischer Automaten

Prof. Dr.-Ing. Frank Schiller \*

Dipl.-Math. Tina Mattes \*

\* Lehrstuhl für Informationstechnik im Maschinenwesen, Fachgebiet Automatisierungstechnik  
Technische Universität München  
Boltzmannstraße 15, D-85748 Garching b. München  
Tel. 089/289-16400  
Fax 089/289-16410  
Email {schiller, mattes}@itm.tum.de

**Schlüsselwörter:** sicherheitskritische Kommunikation, Cyclic Redundancy Check, Prüfsumme, Codierung, Restfehlerwahrscheinlichkeit, stochastischer Automat

An die elektronische Datenübertragung werden in automatisierten Anlagen hohe Ansprüche gestellt. Dabei kommt der sicherheitskritischen Kommunikation eine besondere Bedeutung zu, deren Aufgabe es ist, Verfälschungen aufzudecken, um den Übergang der Anlage in einen sicheren Betriebszustand einzuleiten.

Das CRC-Verfahren (Cyclic Redundancy Check) ist eine effiziente Methode zur Aufdeckung von Übertragungsfehlern [1], [2], [4], [6]. Aus den Originaldaten (Informationsbits) wird eine Prüfsumme FCS (Frame Check Sequence) berechnet und gemeinsam mit den Originaldaten übertragen. Die FCS entspricht dem Rest, der bei der Division der als binäres Polynom aufgefassten Informationsbits durch ein sogenanntes Generatorpolynom entsteht [5]. Diese Operation ist sehr einfach durch ein rückgekoppeltes Schieberegister (LFSR) zu implementieren [7], siehe Abb. 1. Zu jedem

Zeitpunkt  $k$  wird ein Informationsbit  $u(k)$  in das Register geschoben. Das Generatorpolynom  $g$  bestimmt dabei die Art der Rückkopplung. Die FCS

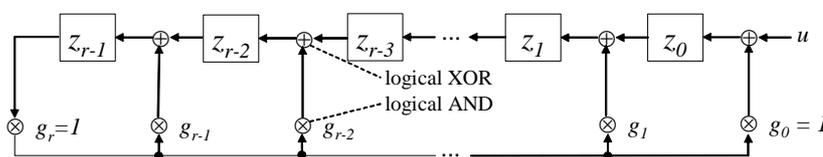


Abbildung 1: Implementierung des CRC durch ein LFSR

und damit die Lösung der Polynom-Modulo-Operation für  $k$  Informationsbits wird durch den Zustand  $z(k)$  des LFSR dargestellt. Der Empfänger nutzt das LFSR, indem die empfangenen Informationsbits gefolgt von der empfangenen FCS eingeschoben werden. Bei korrekter Übertragung sind anschließend alle Bits des Registers auf Null, es können aber auch bestimmte Verfälschungen zu diesem Zustand führen.

Die Restfehlerwahrscheinlichkeit, d.h. die Wahrscheinlichkeit dieses Zustands trotz verfälschter Informationsbits, hängt stark vom verwendeten Generatorpolynom ab [1], [2], [4]. Obwohl der CRC in der Kommunikationstechnik etabliert ist, stellt die Suche passender Generatorpolynome für die verwendeten Telegrammlängen weiterhin eine Herausforderung dar [6]. Speziell bei sicherheitskritischen Anwendungen ist eine sehr kleine Restfehlerwahrscheinlichkeit notwendig, die auch nachgewiesen werden muss. Dieser Nachweis wird in der hier vorgestellten Lösung mit einem stochastischen Automaten durchgeführt. Dazu wird der CRC-Algorithmus durch einen deterministischen Automaten mit den Matrizen  $M_{u=0}$  und  $M_{u=1}$  modelliert, dessen Eingang der Datenstrom der Informationsbits  $u$  und dessen Zustand  $z$  die Registerbelegung der Schaltung in Abb. 1 darstellen:

$$z(k+1) = M_{u=0} \cdot z(k) \cdot (1-u(k)) + M_{u=1} \cdot z(k) \cdot u(k),$$

$$z(0) = (10 \dots 0)^T.$$

Bitverfälschungen werden als eine Exklusiv-Oder-Überlagerung von Fehlermustern modelliert. Daraus folgt, dass zur Analyse nur die Verfälschung  $f(k)$  betrachtet werden muss. Abb. 2 zeigt den Signalflussgraphen dieses Automaten, wenn zusätzlich der fehlerfreie ( $0_{ok}$ ) und der nicht erkennbare fehlerhafte Zustand ( $0_f$ ) unterschieden werden.

Einen stochastischen Automaten [3] erhält man durch das Einbeziehen der Wahrscheinlichkeit der Verfälschung eines Bits  $p$  mit  $p=P(f(k)=1)$ . Das Resultat ist die Wahrscheinlichkeitsverteilung über alle möglichen Zustände, wobei die Wahrscheinlichkeit des nicht erkennbaren fehlerhaften Zustands  $0_f$  die geforderte Restfehlerwahrscheinlichkeit beschreibt. Die übliche Verwendung des Modells des binären symmetrischen Kanals führt zur Berechnungsvorschrift:

$$P(z^*(k+1)) = M_{u=0}^* \cdot P(z^*(k)) \cdot (1-p) + M_{u=1}^* \cdot P(z^*(k)) \cdot p,$$

$$P(z^*(0)) = (10 \dots 0)^T.$$

Im Gegensatz zu anderen Methoden erlaubt dieser Ansatz die Berechnung der Restfehlerwahrscheinlichkeit für sehr große Telegrammlängen (bis zu kBytes). Zusätzlich liegen die Werte für alle Telegrammlängen kleiner als die untersuchte als Zwischenergebnisse vor, so dass Aussagen für Bereiche von Telegrammlängen einfach möglich sind [4], [6].

Im Vortrag wird das Vorgehen ausführlich erläutert, anderen Methoden gegenübergestellt und durch Beispiele illustriert.

## Literatur:

- [1] Castagnoli, G., (1989). *On the Minimum Distance of Long Cyclic Codes and Cyclic Redundancy-Check Codes*, ETH Zurich, Diss. No. 8979.
- [2] Koopman, P. and T. Chakravarty (2004). Cyclic Redundancy Code (CRC) Polynomial Selection for Embedded Networks. In: *International Conference on Dependable Systems and Networks*, DSN 2004, pp. 145-154. Florence, Italy.
- [3] Lunze, J. and J. Schröder (2001). State Observation and Diagnosis of Discrete-event Systems Described by Stochastic Automata. In: *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, No. 11, pp. 319-369.
- [4] Mattes, T. (2004). *Untersuchungen zur effizienten Bestimmung der Güte von Polynomen für CRC-Codes*, Univ. of Trier, Siemens AG, Nuremberg.
- [5] Peterson, W.W. and E.J. Weldon (1996). *Error Correcting Codes*, MIT Press.
- [6] Schiller, F. and T. Mattes (2005). An Efficient Method to Evaluate CRC-polynomials for Safety-critical Industrial Communication. In: *11th Int. Symposium on System-Modelling-Control*, SMC 2005, pp. 269-274. Zakopane, Poland.
- [7] Wagner, M. (1986). On the Error Detecting Capability of CRC Polynomials. In: *Informationstechnik*, 28. Jahrgang, No. 4/1986, pp. 236-241.

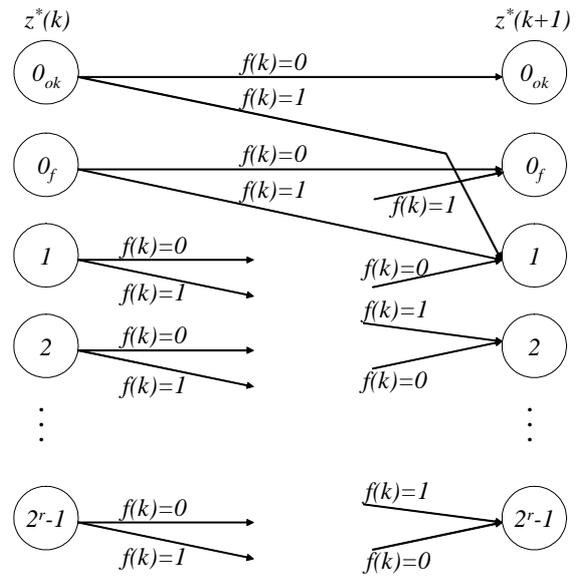


Abbildung 2: Signalflussgraph

# Regelung Dynamischer Systeme mit stochastischer Zeitverzögerung durch ein Kommunikationsnetzwerk

Otto J. Rösch, Prof. Dr.-Ing. Hubert Roth

Universität Siegen

Institut für Regelungs- und Steuerungstechnik

{otto.roesch, hubert.roth}@uni-siegen.de

In der Automatisierungstechnik sind Kommunikationsnetzwerke zur Datenübertragung innerhalb begrenzter Umgebungen weit verbreitet. Zum Einsatz kommen dafür speziell konzipierte Bussysteme, die eine gewisse Echtzeitfähigkeit liefern und somit für eine Regelung von dynamischen Systemen anwendbar sind. Regeleinrichtungen, Aktoren und Sensoren lassen sich auf diese Weise in großen Anlagen direkt über Datenbusleitungen verbinden. Die Integration von Kommunikationsnetzwerken in Regelungssystemen ist im Allgemeinen billiger, reduziert Gewicht und Leistung, ist einfacher zu installieren, wartungsfreundlicher und hat eine höhere Zuverlässigkeit im Vergleich zu klassischen Punkt-zu-Punkt-Verbindungen. Bei derart vernetzten Anlagen können die Datenleitungen auch mit anderen Anwendungen geteilt werden; als größte vernetzte Anlage kann das Internet betrachtet werden. Bei großen Entfernungen kommen bestehende Internetverbindungen zum Einsatz, da spezielle Netzwerk-Systeme zu teuer oder gar nicht realisierbar wären, wie z.B. transatlantische Verbindungen.

Durch eine enorm gestiegene Datenübertragungsrate und Reaktionsgeschwindigkeit von Kommunikationsnetzwerken ist nicht nur die Fernsteuerung oder Fernwartung, sondern auch die Regelung von Systemen über große Entfernungen ermöglicht worden. Ein steigendes Interesse ist dabei nicht nur in der Forschung, sondern auch bei industriellen Anwendungen zu vermerken, um eine direkte Integration von Kommunikationsnetzwerken in die Regelung zu ermöglichen. So lassen sich an ein bestehendes IP-Netzwerk verschiedene Geräte wie Sensoren, Aktuatoren, Regeleinrichtungen wie auch Überwachungs- und Steuergeräte direkt anschließen.

Um dynamische Systeme über nicht echtzeitfähige Kommunikationsnetzwerke zu regeln werden verschiedene Regelungsansätze vorgestellt. Betrachtet werden IP-Netzwerke, bei denen stochastische Signallaufzeiten in der Datenübertragung auftreten. Diese Zeitverzögerung verschlechtert das Stabilitätsverhalten und wird bei den folgenden Regelungsentwürfen entsprechend berücksichtigt.

Ausgehend von einem Regelungsentwurf nach dem Ljapunow-Razumikhin-Theorem [NIC] und [GU] wird ein Regler für ein System mit veränderlicher und kleiner Zeitverzögerung berechnet. Diese berechneten Regelungsparameter werden anschließend mit einem genetischen Algorithmus weiter optimiert, um eine adaptive

Regelung für verschiedene und größere Zeitverzögerungen zu erhalten [ROE]. An einer Höhenregelung eines realen Labor-Hubschraubers wird abschließend diese adaptive Zustandsraumregelung demonstriert und ein Vergleich zu dem ursprünglichen Ansatz nach dem Razumikhin-Theorem gezogen.

Ein weiterer Ansatz zur Regelung dynamischer Systeme mit stochastischen Signallaufzeiten basiert auf einem Zeitverzögerungsmodell einer konkreten Netzwerkverbindung [DON]. Die Zeitverzögerung ist als Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktion gegeben [SAL]. Der ursprüngliche Regelungsansatz erfolgt im Zeitbereich, wobei der spätere Regelungsentwurf im Laplace-Bereich durchgeführt wird. Einfache Regelungsgesetze kommen zum Einsatz, um asymptotische Stabilität des geschlossenen Regelkreises zu erhalten. Eine abschließende Simulation verifiziert die gewonnenen Ergebnisse, welche auch für eine variierende Zeitverzögerung ein stabiles Regelungsverhalten aufzeigt.

Ein Ansatz mit adaptiver Regelung ist allgemein notwendig, um einen sehr großen Bereich der Signallaufzeit abzudecken. Bei solch einer Regelung ist die Messung der Zeitverzögerung von Datenpaketen im Netzwerk eine sehr wichtige Forderung, auf die abschließend noch eingegangen wird.

## Literatur

- [DON] N. MacDonald  
Biological delay systems: linear stability theory; Cambridge University Press, Cambridge, 1998
- [GU] Keqin Gu, Vladimir L. Kharitonov, Jie Chen  
Stability of Time-Delay Systems, Birkenhäuser, 2003
- [NIC] S.-I. Niculescu, M. Fu, H. Li  
Delay Dependent Closed Loop Stability of Linear Systems with Input Delay: An LMI Approach, Proceedings of the 36th Conference on Decision & Control, San Diego, California, USA, December 1997
- [ROE] O. Roesch, H. Roth, A. Iqbal,  
Extended Stability margins on controller Design for Nonlinear Input Delay Systems, IFAC World-Congress, Prague, 2005.
- [SAL] Salza, S., Draoli, M., Gaibisso, C., Palma, A.L., Puccinelli, R.  
Methods and Tools for the Objective Evaluation of Voice-over-IP Communications. In INET 2000, The 10th Annual Internet Society Conference, Yokohama, Japan.

# Optimierung von Aktuatorik und Flugregelung für künftige Verkehrsflugzeuge mit voll-elektrischer Energieversorgung

Christian Schallert

Institut für Robotik und Mechatronik  
DLR Oberpfaffenhofen  
82234 Wessling  
Tel. +49 8153 28 2408  
Fax +49 8153 28 1441  
christian.schallert@dlr.de

**Schlüsselwörter:** More-Electric Aircraft, Flugregelungssystem, Steuerflächenaktuator, Stellrate, Totzeit, Flugeigenschaften, Regleroptimierung

In künftigen Verkehrsflugzeugen werden die hydraulischen und pneumatischen Bordnetze zunehmend durch elektrische Bordnetze ersetzt. Dieser Trend zeigt sich bereits bei den gegenwärtig neu entwickelten Verkehrsflugzeugen, der B787 und A380. Durch die Elektrifizierung von Bordsystemen können bessere Wirkungsgrade, höhere Zuverlässigkeit und geringerer Wartungsaufwand erreicht werden. Diese Vorteile der elektrischen Bordsysteme werden allerdings mit einem im Vergleich höheren Gewicht erkauft. Ein Ziel der Entwicklungsaktivitäten ist es daher, das Gewicht der elektrischen Bordsysteme und der Endverbraucher zu verringern.

Auch für das Flugregelungssystem kommen zunehmend Steuerflächenaktuatoren mit elektrischem Antrieb zum Einsatz, die im Vergleich mit konventionellen hydraulischen Aktuatoren komplexer, somit entsprechend größer und schwerer sind. Dies ist problematisch, weil die Aktuatoren in elastischen und schmalen Flügelprofilen eingebaut werden müssen. Der Vortrag zeigt einen Weg auf zur Senkung von Gewicht und Baugröße von Flugsteuerungsaktuatoren mit elektrischem Antrieb. Dabei werden die Anforderungen an die Leistung dieser Aktuatoren, insbesondere die erforderliche Stellrate, durch die Betrachtung von flugdynamischen und flugregelungstechnischen Aspekten hinterfragt und neu definiert. Bei Aktuatoren mit elektrischem Antrieb besteht eine starke Abhängigkeit des Gewichts und der Baugröße von der maximalen Stellrate.

*Abbildung 1: Schema eines  
Flugregelungssystems*



*Abbildung 2: Elektrohydrostatischer Aktuator*



Um den Einfluß der Aktuatordynamik und Stellrate auf die Flugeigenschaften beurteilen zu können, wird die Flugsystemdynamik eines Verkehrsflugzeuges modelliert. Dies beinhaltet eine nichtlineare Beschreibung der Flugmechanik und Aerodynamik, die als Modellbibliothek in der objekt-orientierten Sprache Modelica beim DLR entwickelt wurde [1]. Das Flugregelungssystem wird durch eine Reglerstruktur und eine Totzeit beschrieben. Die wesentlichen Merkmale der Reglerstruktur sind der Literatur entnommen [2]. Bei fly-by-wire Flugzeugen ist der Flugregler in totzeitbehafteten Flugsteuerungsrechnern implementiert. Die Totzeit bewirkt eine verzögerte Ausgabe von Pilotenkommandos an die Steuerflächen. Die Aktuatoren werden physikalisch oder als vereinfachte Verzögerungsglieder, in beiden Fällen mit begrenzter Stellrate, modelliert. Die einzelnen Teilmodelle, d. h. der Flugregler, die Rechner-Totzeit, die Aktuatoren sowie die Flugdynamik werden zum gesamten, nichtlinearen Flugsystemdynamik-Modell zusammengeführt.

Die Flugeigenschaften werden mithilfe geeigneter Kriterien quantitativ beurteilt. Beispielsweise wird mit einem Kriterium zur Bandbreite [3] der Frequenzbereich bewertet, in dem der Pilot den Längslagewinkel des Flugzeugs regeln kann, ohne daß die Stabilität gefährdet wird. Das Verhalten bei sprung- oder blockförmigen Kommandos des Piloten wird mit einem Kriterium zur Anstiegs- und Beruhigungszeit der Nickrate beurteilt [4]. Mit dem sog. OLOP-Kriterium (Open-Loop Onset Point) [5] wird ein Verfahren zur Beurteilung der Tendenz zu unzulässigen Grenzyklen des Pilot-Flugzeug-Regelkreises angewendet.

Es wird eine Sensitivitätsanalyse mit Variation der Aktuatorstellrate und der Totzeit des Flugregelungssystems durchgeführt. Angestrebt wird eine Minimierung der Stellrate (Gewichtseinsparung) bei der größten noch hinnehmbaren Totzeit (höhere Anforderungen an das Flugregelungssystem durch Verkürzung der Totzeit). Für jede Kombination von Stellrate und Totzeit muß der Flugregler neu optimiert werden. Dies erfolgt automatisiert mithilfe des für mehrzielige Optimierungsprobleme entwickelten Werkzeugs MOPS [6]. Dabei wird in jeder Iteration eine Simulation der Flugsystemdynamik, Auswertung der Kriterien und Berechnung einer Gütefunktion durchgeführt. Zur Gesamtbewertung ist ein Vergleich der ermöglichten Gewichtseinsparung der Steuerflächenaktuatoren mit der erhöhten Anforderung an das Flugregelungssystem vorgesehen.

## Literatur

- [1] Moormann, D.: *Automatisierte Modellbildung der Flugsystemdynamik*. Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 8, Nr. 931, 2001.
- [2] Brockhaus, R.: *Flugregelung*. Springer-Verlag, 1994.
- [3] Unbekannt: *Flying Qualities of Piloted Aircraft*. MIL-HDBK-1797, U. S. Department of Defense, 1997.
- [4] Mooij, H. A.: *Criteria for low-speed longitudinal handling qualities of transport aircraft with closed-loop flight control systems*. National Aerospace Laboratory NLR, The Netherlands, 1984.
- [5] Duda, H.: *Fliegbarkriterien bei begrenzter Stellgeschwindigkeit*. Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt DLR e. V., 1997.
- [6] Joos, H.-D., Bals, J., Looye, G., Schnepfer, K., Varga, A.: *A multi-objective optimisation-based software environment for control systems design*. IEEE International Conference on Control Applications and International Symposium on Computer Aided Control Systems Design, Glasgow, Scotland, UK, September 18-20, 2002, Proc. of CCA/CACSD 2002, P. 7-14, 2002.

# Ausgewählte Regelungsverfahren für humanoide Laufroboter

Dirk Wollherr

Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik  
Ordinarius Prof. Dr.-Ing./Univ. Tokio Martin Buss  
Technische Universität München  
80290 München  
Tel. 089-289-23405  
Fax 089-289-28340  
Email [dw@tum.de](mailto:dw@tum.de)

**Schlüsselwörter:** humanoide Laufroboter, Gangregelung, Jacobi Compensation, hybride Regelung

Aktuelle Herangehensweisen für das Problem zweibeinigen humanoiden Laufens können im Wesentlichen in zwei Ansätze unterteilt werden: Schrittrajektorien werden entweder online entsprechend der aktuellen Intention und sensoriiellen Wahrnehmung des Roboters berechnet, oder eine große Menge von Trajektorien wird im Voraus berechnet und der Roboter wählt die Trajektorie aus, die in einer gegebenen Situation der gewünschten Bewegung möglichst genau entspricht.

In der Praxis müssen existierende dynamische Bewegungstrajektorien häufig an neue Situationen angepasst und somit leicht verändert werden, um beispielsweise Regelungsfehler zu kompensieren oder leicht veränderte Umgebungen zu berücksichtigen. Hierzu wird ein Verfahren mit dem Namen *Jacobi Compensation* vorgestellt, das es erlaubt, ausgewählte Körperteile in karthesische Koordinatenrichtungen zu schieben, siehe Abb. 1.

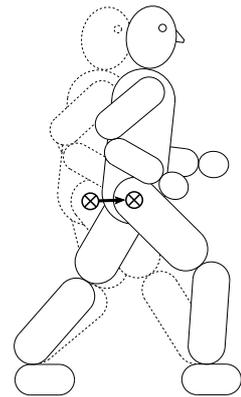


Abbildung 1: Ausgewählte Körperteile werden per Jacobi Compensation bewegt.

Ein weiterer Schwerpunkt beschäftigt sich mit einem Aspekt hybrider Regelung bei Laufmaschinen. Während vollaktuierte humanoide Laufroboter in Bezug auf Flexibilität und Leistungsfähigkeit gegenüber passiven Läufern klare Vorteile aufweisen, erscheinen Laufbewegungen, die unter Ausnutzen der natürlichen Dynamik entstanden sind, sehr dynamisch und „mensenähnlich“. In dem Versuch, die positiven Eigenschaften beider Ansätze zu vereinen, wurde für den Roboter UT-Theta der University of Tokyo ein besonderes Kniegelenk entwickelt, das zwischen aktivem Antrieb und passivem Schwingen des Unterschenkels umschalten kann, siehe Abb. 2.

Diese Konstruktion bringt neben den neuen Bewegungsmöglichkeiten aber auch regelungstechnische Probleme mit sich, da einerseits nicht instantan zwischen den beiden

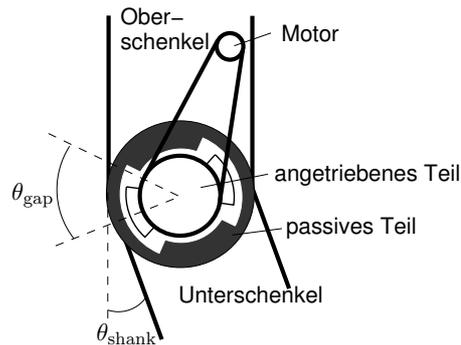


Abbildung 2: Principle of the backlash clutch.

Modi umgeschaltet werden kann und andererseits im aktuierten Modus zu einem gegebenen Zeitpunkt nur in einer Richtung eine Kraft auf den Unterschenkel aufgebracht werden kann. Es wird ein hybrider, nichtlinearer Regler basierend auf dem Konzept der Invarianzregelung vorgestellt, der es erlaubt, zwischen den Modi in minimaler Zeit umzuschalten, wobei gleichzeitig sichergestellt wird, dass unbeabsichtigte Stöße auf den Unterschenkel vermieden werden und somit sanfte Bewegungen ermöglicht werden.

## Literatur

- [1] M. Sobotka, D. Wollherr, and M. Buss. A jacobian method for online modification of precalculated gait trajectories. In *Proceedings of the 6th International Conference on Climbing and Walking Robots*, pages 435–442, Catania, Italy, 2003.
- [2] D. Wollherr and M. Buss. Posture modification for biped humanoid robots based on jacobian method. In *Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS*, pages 124–129, Sendai, Japan, 2004.
- [3] D. Wollherr, F. Zonfrilli, and Y. Nakamura. Active-passive knee control for the humanoid UT-Theta. In *Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics*, pages 692–697, Seattle, Washington, USA, 2005.
- [4] Dirk Wollherr. *Design and Control Aspects of Humanoid Walking Robots*. Number 1078 in VDI Fortschritt-Berichte, Reihe 8. VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, 2005.