

Steuerungs- und Regelungsentwurf für Transportsysteme mit örtlich verteilt wirkendem Stelleingriff

Von der Fakultät
Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der
Universität Stuttgart
zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Simon Alt
geboren in Immenstadt

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Rudibert King

Tag der mündlichen Prüfung: 16. Mai 2017

Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart

2017

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Band 33

Simon Alt

Steuerungs- und Regelungsentwurf für Transportsysteme mit örtlich verteilt wirkendem Stelleingriff

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Aachen 2017

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5399-9

ISSN 1863-9046

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart. Die durchgeführten Untersuchungen wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Projekts „Differenzialalgebraische Methoden zur Steuerung und Regelung verteiltparametrischer Systeme mit verteiltem Eingriff“ gefördert.

Mein besonderer Dank gilt dem Institutsdirektor Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny, der mich bei meiner Arbeit stets unterstützt und gefördert hat. Seine Betreuung und sein entgegengebrachtes Vertrauen machten das Entstehen und Gelingen dieser Arbeit erst möglich.

Ebenso möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Rudibert King vom Institut für Prozess- und Verfahrenstechnik der Technischen Universität Berlin für sein Interesse an meinen Untersuchungen und der Übernahme des Mitberichts danken. Herrn Prof. Dr. rer. nat. Dr. h.c. mult. Rainer Gadow vom Institut für Fertigungstechnologie der Universität Stuttgart danke ich für die bereitwillige Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Herzlich danken möchte ich Herrn Prof. (i.R.) Dr.-Ing. Dr. h.c. Michael Zeitz für die hervorragende Hilfe und Unterstützung bei der Entstehung dieser Arbeit. Ich habe seinen Rat und die vielen fruchtbaren und bereichernden Diskussionen immer sehr geschätzt.

Auch Herrn Dr.-Ing. Eckhard Arnold gilt mein herzlicher Dank für seine Unterstützung. Seine fachlichen Anregungen haben diese Forschungsarbeit sehr bereichert. Hervorheben möchte ich auch unsere gemeinsame Zusammenarbeit im Rahmen meiner Lehrtätigkeiten am Institut, die mir immer sehr große Freude bereitet haben.

Meinen Institutskollegen danke für die vielfältige Unterstützung und das freundschaftliche Miteinander in all den Jahren. Sie haben die Zeit am Institut zu etwas ganz Besonderem gemacht. Besonders danke ich Kai-Uwe Amann, Stefan Schaut und Kevin Schmidt, die durch zahlreiche fachlichen Gespräche und Diskussionen wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Bei Corina Hommel und Gerlind Preisenhammer bedanke ich mich für das immer offene Ohr und die große Hilfe bei organisatorischen Angelegenheiten.

Meinen Studenten danke ich für die Unterstützung in Form von Diskussionen, Abschlussarbeiten und wissenschaftlichen Hilfstätigkeiten.

Meine Forschungsarbeit wurde ganz wesentlich von einer fruchtbaren Kooperation mit der Dürr Systems A.G. zur Optimierung und Automatisierung verfahrenstechnischer Prozesse geprägt. Herrn Dr.-Ing. Martin Weickgenannt danke ich ganz herzlich für seine Betreuung des Kooperationsprojekts und seinen Rückhalt bei der Erstellung meiner Dissertation. Hauke Bensch und Helena Rasp danke ich für die Unterstützung bei der Beantwortung zahlreicher prozesstechnischer Fragestellungen in dieser Arbeit. Darüber hinaus möchte ich dem gesamten Team für die freundschaftliche und kollegiale Zusammenarbeit in all den Jahren danken.

Ganz besonders danke ich meiner Familie für die liebevolle Unterstützung und den bedingungslosen Rückhalt während meines Studiums und meiner Promotion. Vielen Dank für euer Verständnis, eure Ermutigungen und euer großes Vertrauen in mich.

Stuttgart, im Juli 2017

Simon Alt

Kurzfassung

Die in der Arbeit betrachteten Transportsysteme sind Rohrleitungen oder Förderbänder in der Prozess- und Produktionstechnik, die den Stofftransport zwischen einzelnen Prozessstufen realisieren. In der Regelungstechnik wird das Ein-Ausgangs-Verhalten von Transportsystemen durch eine Totzeit modelliert, die sich aus dem Transportweg und der Transportgeschwindigkeit ergibt. Das Ein-Ausgangs-Verhalten von Transportsystemen wird komplexer, wenn die Stoffeigenschaften durch einen Stelleingriff entlang des Transportwegs verändert werden. Solche Veränderungen betreffen beispielsweise das Abkühlen oder Aufheizen des Transportguts durch eine Kühlung oder Heizung entlang des Transportwegs. Technische Beispiele sind gasbeheizte Glasspeiser zur Konditionierung der Glasschmelze oder beheizte Rohrleitungen für die Temperierung von Wärmespeichern.

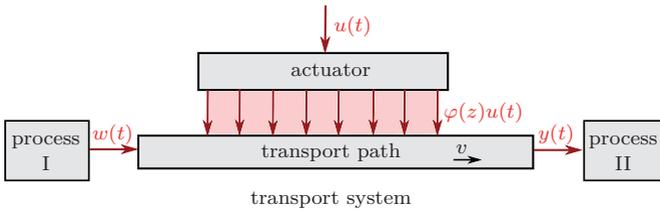
Transportsysteme mit einem verteilt wirkenden Stelleingriff sind typischerweise mit einer Steuerung und Regelung verknüpft, um die Konditionierung des Transportguts entsprechend den Vorgaben durch die nachfolgende Prozessstufe zu realisieren. Dabei werden die Sollwerte für die Steuerungs- und Regelungsaufgabe durch die nachfolgende Prozessstufe vorgegeben, die den Ausgang des Transportsystems definiert. Die Wirkung des verteilten Stelleingriffs auf den Ausgang wird durch ein lineares zeitinvariantes Single-Input Single-Output (SISO)-Modell mit verteilten Totzeiten beschrieben. Bisher ist die Steuerung und Regelung von Transportsystemen auf der Basis des SISO-Modells mit verteilten Totzeiten nur exemplarisch anhand von Anwendungen untersucht worden.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem modellbasierten Entwurf von Steuerungen und Regelungen für Transportsysteme mit einem verteilt wirkenden Stelleingriff, um dem Ausgang ein gewünschtes Führungsverhalten beispielsweise bei einem Arbeitspunktwechsel der nachfolgenden Prozessstufe aufzuprägen. Dabei soll der Ausgang des Transportsystems von einem konstanten Anfangswert in einen konstanten Endwert überführt werden. Für die gezielte Beeinflussung des Ausgangs werden totzeitbehaftete SISO-Modelle entwickelt, die einen neuen methodischen Zugang zum modellbasierten Steuerungs- und Regelungsentwurf erlauben. Dabei werden auch Stellgrößenbeschränkungen untersucht. Die Steuerungen und Regelungen werden im Zeit- und Frequenzbereich entworfen und bilden die Grundlage für erweiterte Regelkreisstrukturen wie die Zwei-Freiheitsgrade-Regelung und die Modell-Prädiktive Regelung für Transportsysteme mit einem verteilt wirkenden Stelleingriff. Die untersuchten Entwurfsverfahren werden anhand industrieller Prozessbeispiele veranschaulicht und simulativ validiert. Damit ist belegt, dass die entwickelten Verfahren zur Steuerung und Regelung von Transportsystemen mit örtlich verteilt wirkendem Stelleingriff angewendet werden können.

Extended abstract

The transport systems under consideration are conduits or conveyor belts in industrial engineering applications, which are used for transporting material between different process stages. In the field of automatic control, the input/output (I/O) behavior of linear transport systems is modelled by time delays.

The I/O behavior of transport systems becomes more complex if the material properties are modified by an input which acts spatially distributed along the transport path, as it is exemplarily illustrated in the Figure below.



The illustrated transport system connects two processes I and II with each other and possesses a distributed acting actuator. The actuator is used for conditioning the material properties of the subsequent process II. These modifications are, for example, cooling or heating processes of the conveyed goods by devices installed along the transport path. Technical examples are actuated conduits for heat accumulators or gas-heated glass feeders conditioning a liquid glass flow.

The properties of the transported goods are determined by the boundary input $w(t)$ of process I and are modified by the distributed acting control input $u(t)$ along the transport path. The material property at the end of the transport path defines the control output $y(t)$ and is usually a measured value.

While the transient behavior between the boundary input $w(t)$ and the output $y(t)$ is governed by a lumped time delay, the spatially distributed control input $u(t)$ induces multiple time delays resulting from the spatial distribution of the actuator and the transport velocity. In analogy to the distributed acting control input, the I/O behavior is modelled by distributed time delays, which characterize the investigated transport systems.

Transport systems with a spatially distributed control input are active control devices for the production process, which are used for the transport of material and the conditioning of the conveyed goods at the same time. Therefore, the investigated transport systems are related to a control task in order to realize required setpoints for the subsequent process stage. Thereby, the complex I/O behavior has to be considered for the model-based feedforward and feedback control design.

The governing model equations for the investigated transport systems comprise a linear time-invariant first-order partial differential equation (PDE) with an inhomogeneous right hand side for the spatially distributed control input. The control input is modelled by a spatial characteristic function and a time dependent input signal. The influence of the distributed control input to the output is governed by a linear time invariant Single-Input Single-Output model with distributed delays.

Until now, the model based feedforward and feedback control design for transport systems has only been exemplarily investigated on the basis of PDE models [12], [33], [41]. First investigations in [3] and [5] have shown, that I/O models provide an alternative approach for the model-based feedforward and feedback control design of linear transport systems with comparable results to the PDE approaches. As a main advantage of I/O models, the control design can be set into a classical control theoretical context, which permits under the assumption of linearity and time-invariance a systematic design approach in the time and frequency domain.

Motivated by the preliminary considerations in [3] and [5], in this work a methodology of the feedforward and feedback control design for transport systems with a spatially distributed control input based on the I/O-models with distributed delays is developed. Thereby, the aim is to realize a desired disturbance and tracking behavior for the control output.

As a first stage of this work, the I/O models of transport systems are derived from the spatially distributed model equations in the time and frequency domain for different actuator characteristics. The I/O models are analyzed with regard to the relevant system properties for the feedforward and feedback control design. As technical examples, the well investigated industrial glassfeeder and a heat accumulator with an actuated hot water supply are considered.

Based on the I/O models, two different feedforward and feedback control designs in the frequency and time domain are investigated. The control task is defined by a setpoint change of the subsequent process stage. Thereby, the output of the transport system is tracked from a constant initial value to a final value according to the process specifications.

In the frequency domain, an inversion-based feedforward control design for transport systems with spatially distributed control input is investigated. The inversion-based approach is based on a planned output trajectory, which realizes the output transition between the desired constant values. The corresponding input trajectory is calculated

by the inverse frequency domain I/O model. In order to reject unknown disturbances and model uncertainties, the inversion-based feedforward controller is complemented by a feedback controller to a Two-Degrees-Of-Freedom control structure. For the feedback control design the results of the inversion-based feedforward control are used.

As an alternative approach to the control design in the frequency domain, an optimal feedforward and feedback control for transport systems is investigated. The optimal feedforward control permits the consideration of input constraints, as they arise in most industrial applications. The design of optimal feedforward controls is based on the solution of an optimal control problem defined on a finite time horizon. Thereby, a state space representation with time delays is used for the formulation of the control design equations. For the numerical solution of the resulting boundary value problem with time delays, a Galerkin approach is applied, which results in a fast computation time of the optimal control.

The methodology of the optimal feedforward control design for transport systems is extended to a Model Predictive Control to compensate boundary disturbances and model uncertainties. The Model Predictive Control design is based on the cyclic solution of the optimal feedforward control problem, which allows the explicit consideration of input constraints. The proposed control design guarantees both feasibility and closed-loop stability of the Model Predictive Control for linear transport systems.

The investigated design approaches are illustrated by industrial process examples and validated by simulations, which proves that the proposed methods can be used for transport systems with a spatially distributed control input. The consistent and comprehensive design of feedforward and feedback controls shows the capability of the presented methodology for linear time-invariant transport systems with a spatially distributed control input.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	11
1.1	Problembeschreibung	11
1.2	Literaturüberblick	13
1.3	Gliederung der Arbeit	16
2	Modelle von Transportsystemen mit örtlich verteilt wirkendem Stelleingriff	17
2.1	Örtlich verteiltes Transportmodell	17
2.2	Ein-Ausgangs-Modell des Transportsystems	19
2.2.1	Förderband mit zwei diskreten Materialzuführungen	21
2.2.2	Transportsystem mit kontinuierlicher Orts-Charakteristik	23
2.3	Anwendungsbeispiele	27
2.3.1	Industrieller Glasspeiser	27
2.3.2	Beheizter Zulauf eines Wärmespeichers	30
2.4	Zusammenfassung	33
3	Modellbasierte Steuerung	35
3.1	Steuerungsaufgabe	35
3.2	Analyse des Ein-Ausgangs-Verhaltens	36
3.2.1	Förderband mit zwei diskreten Materialzuführungen	36
3.2.2	Transportsystem mit kontinuierlicher Orts-Charakteristik	37
3.3	Flachheitsbasierter Steuerungsentwurf	38
3.4	Inversionsbasierter Steuerungsentwurf	40
3.4.1	Förderband mit zwei diskreten Materialzuführungen	40
3.4.2	Transportsystem mit kontinuierlich wirkendem Stelleingriff	43
3.5	Anwendungsbeispiel: Industrieller Glasspeiser	49
3.6	Zusammenfassung	50
4	Optimale Steuerung	53
4.1	Totzeitbehaftete Zustandsdarstellung von Transportsystemen	53
4.1.1	Untersuchung des Ein-Ausgangs-Verhaltens	55
4.2	Optimalsteuerungsproblem	58
4.3	Optimaler Steuerungsentwurf	60
4.3.1	Berechnung der optimalen Steuerung	60
4.3.2	Konstante Fortsetzung	64
4.3.3	Fortsetzung durch Totzeitkompensation	65

4.4	Anwendungsbeispiel: Beheizter Zulauf eines Wärmespeichers	70
4.5	Zusammenfassung	72
5	Behandlung von Randstörungen	73
5.1	Störverhalten von Transportsystemen	73
5.2	Kompensation bekannter Störungen	74
5.3	Ausregelung unbekannter Randstörungen	76
5.3.1	Regelungsentwurf im Frequenzbereich	76
5.3.2	Modell-Prädiktive Regelung (MPC)	81
5.4	Zusammenfassung	89
6	Zusammenfassung	91
A	Beispiele für praktisch relevante Orts-Charakteristiken	95
B	Lösung der örtlich verteilten Transportgleichung	97
C	Differenzgrade der Übertragungsfunktionen	99
D	Zeitvariante Transportsysteme	101
E	Zustandsdarstellung für allgemeine Orts-Charakteristiken	105
F	Diskretisierung der Zweipunkt-Randwertaufgabe	107
G	Grundprinzip der Modell-Prädiktiven Regelung	109
	Symbolverzeichnis	111
	Abbildungsverzeichnis	113
	Tabellenverzeichnis	115
	Literatur	117