

Julian Wanner

## **Modellierung, Steuerung und Regelung für den Verteilermast einer Autobetonpumpe**

Band 74

**Berichte aus dem  
Institut für Systemdynamik  
Universität Stuttgart**



# Modellierung, Steuerung und Regelung für den Verteilermast einer Autobetonpumpe

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

von

Julian Wanner  
geboren in Augsburg

Hauptberichter: Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Knut Graichen

Tag der mündlichen Prüfung: 15. Mai 2023

Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart

2023



Berichte aus dem  
Institut für Systemdynamik  
Universität Stuttgart

Band 74

**Julian Wanner**

**Modellierung, Steuerung und Regelung  
für den Verteilermast einer Autobetonpumpe**

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag  
Düren 2024

**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., 2023

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9369-8

ISSN 1863-9046

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

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

# Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik (ISYS) der Universität Stuttgart. Ich möchte besonderen Dank an meinen Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny, für die wissenschaftliche Betreuung, die Unterstützung sowie das entgegengebrachte Vertrauen und die Freiheiten während meiner Anstellung am Institut richten. Außerdem möchte ich mich herzlich bei Prof. Dr.-Ing. Knut Graichen, Leiter des Lehrstuhls für Regelungstechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, für die Übernahme des Mitberichts und die sehr gründliche Durchsicht meiner Arbeit bedanken. Prof. Dr.-Ing. Bernd Gundelsweiler, Direktor des Instituts für Konstruktion und Fertigung in der Feinwerktechnik der Universität Stuttgart danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Die Arbeit entstand in einem Kooperationsprojekt mit der Liebherr-Mischtechnik GmbH in Bad Schussenried. Mein Dank gilt Walter Lenz, Martin Kiebler, Reimar Beierlein und Thomas Graupeter. Für die kompetente und umfassende Unterstützung in den vielen Stunden am Versuchsgerät bedanke ich mich bei Rainer Berner, Alexander Stephan, Benedikt Stöhr und die restlichen Mitarbeiter der Versuchsabteilung.

Ohne die zahlreichen fachlichen Diskussionen und das freundschaftliche Miteinander am Institut wäre die Arbeit nicht möglich gewesen. Mein besonderer Dank gilt Hannes Wind, Florentin Rauscher, Jonas Missler, Matthias Thomas, Bernhard Rolle, Marc Wehmeier, Stefan Schaut, Alexander Keck und Eckhard Arnold. Für die organisatorische und technische Unterstützung geht mein Dank an Gerlind Preisenhammer, Corina Hommel, Philipp Arnold, Joachim Endler und Sven Gutekunst. Für die ständige Ermutigung und die inhaltlichen Diskussionen während der Schreibphase der Dissertation bedanke ich mich bei Patric Skalecki. Mein besonderer Dank geht an meinen Bürokollegen Simon Densborn der mir stets mit Rat und Tat zur Seite stand und von dessen Fachwissen und kreativen Lösungen ich profitieren durfte. Meiner Familie danke ich für die beständige Unterstützung und den bedingungslosen Rückhalt während des Studiums und der Promotion.

Zuletzt danke ich dir, liebe Kathi, für eine stetige und liebevolle Unterstützung, deine Geduld und dein Verständnis.

Augsburg, im Oktober 2023

Julian Wanner



# Kurzfassung

Die Steuerung von Autobetonpumpen ist eine anspruchsvolle Aufgabe, die Konzentration und viel Erfahrung erfordert. Der Grund dafür liegt zum einen in dem gewichtsoptimierten Aufbau des Verteilermasts und der damit verbundenen Anfälligkeit für elastische Schwingungen. Zum anderen stellt die Beherrschung der kinematischen Zusammenhänge des mehrgliedrigen Masts eine Herausforderung dar. Die Aufgabe wird durch die unstrukturierte Umgebung der Baustelle zusätzlich erschwert. Assistenzsysteme schaffen hierbei Abhilfe, indem sie den Fahrer bei der Bedienung des Fahrzeugs unterstützen. Sie erhöhen damit die Handhabbarkeit und die Sicherheit der Maschine. In der vorliegenden Arbeit wird die Entwicklung einer aktiven Schwingungsdämpfung zur Minimierung der bewegungs- und pumpinduzierten Strukturschwingungen sowie eine Geometriesteuerung zur Verbesserung der Bedienbarkeit des Mastes auf der Baustelle vorgestellt. Die Verfahren werden prototypisch an einer Autobetonpumpe validiert.

Die Grundlage beider Systeme stellt die mathematische Beschreibung des Gesamtsystems dar. Zu diesem Zweck wird ein flexibles Mehrkörpersystem des Verteilermasts basierend auf dem Newton-Euler-Formalismus hergeleitet. Die Beschreibung der Flexibilität beruht auf dem Ritz-Ansatz und nutzt die Methode des bewegten Bezugssystems. Neben der Mechanik enthält das Modell eine vereinfachte Beschreibung der hydraulischen Antriebe und der Umlenkmechanismen.

Die aktive Schwingungsdämpfung reduziert die vertikalen und horizontalen Schwingungen des Verteilermasts über eine gezielte Ansteuerung der Antriebe. Das System ist als eine modellbasierte, modale Zwei-Freiheitsgrade-Regelung ausgeführt und umfasst einen linear-quadratischen Zustandsregler mit Beobachter und eine filterbasierte Vorsteuerung. Zur Berücksichtigung der nichtlinearen Verteilermastbewegungen kommt ein Gain-Scheduling-Verfahren zum Einsatz, das die Reglerparameter in Abhängigkeit der aktuellen Mastkonfiguration adaptiert.

Die Geometriesteuerung vereinfacht die Steuerung des Verteilermasts, indem die Sollbewegung des Endeffektors direkt vorgegeben wird. Die Steuerung berechnet dabei die dazu notwendige Gelenkbewegung. Der Ansatz beruht auf der inversen Kinematik und wird über ein beschränktes, quadratisches Optimierungsproblem gelöst. Die Nebenbedingungen berücksichtigen system- und umgebungsspezifische Anforderungen der Autobetonpumpe. Sie umfassen unter anderem die Deformationskompensation der Verformungen im Verteilermast, die Volumenstrombeschränkung der hydraulischen Antriebe, die Standsicherheitsüberwachung sowie die Kollisionsvermeidung.



# Abstract

The operation of a truck-mounted concrete pump presents significant challenges due to its weight-optimized boom design, which makes it susceptible to structural vibrations and its complex kinematic structure, making it difficult to accurately position the end effector. These difficulties are compounded by the unstructured construction site environment. To improve the usability and safety of the machine, assistance systems have been developed to aid the machinist with the control task. In this thesis, a vibration dampening system to reduce structural vibrations and a tool-center point (TCP) control to enhance operability are presented. The effectiveness of these algorithms is validated prototypically on a concrete pump.

Both systems are based on the mathematical model of the machine. For this purpose, a flexible multibody system of the boom is derived by applying the Newton-Euler formulation. The model uses the Ritz method and the floating frame of reference approach to describe the elastic deformations. The hydraulic actuators and the corresponding mechanical linkages at the joints are considered as a simplified reduced-order system.

The active vibration control system reduces the vertical and horizontal vibrations of the boom by using the hydraulic actuators. The approach uses a modal two-degree-of-freedom controller with a linear-quadratic regulator and an observer. The feedforward control is based on notch filters. A gain scheduling approach takes the nonlinear movements of the manipulator into account. The control parameters are thereby adapted according to the current boom configuration.

The TCP controller simplifies the boom operation by allowing the end-effector speed to be specified directly. The control system then automatically calculates the necessary joint movements. The approach uses constrained quadratic optimization to solve the underlying inverse kinematics. The constraints consider requirements and limitations of the system and its environment. They include, among other things, the deformation compensation for the boom deflection, the volumetric flow rate constraint of the hydraulic actuators, the tilt stability system, and the collision avoidance with obstacles in the environment.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Aufbau der Autobetonpumpe . . . . .	2
1.1.1	Verteilermast . . . . .	4
1.1.2	Abstützung . . . . .	5
1.1.3	Pumpeinheit . . . . .	6
1.1.4	Rechner- und Kommunikationsstruktur . . . . .	7
1.2	Stand der Technik . . . . .	8
1.2.1	Modellierung . . . . .	9
1.2.2	Aktive Schwingungsdämpfung . . . . .	13
1.2.3	Geometriesteuerung . . . . .	17
1.3	Ziele der Arbeit . . . . .	20
1.4	Aufbau der Arbeit . . . . .	21
<b>2</b>	<b>Modellierung des Verteilermasts</b>	<b>23</b>
2.1	Modellstruktur . . . . .	23
2.1.1	Topologie und Koordinaten . . . . .	24
2.1.2	Bewegungsgleichungen . . . . .	27
2.2	Flexible Körper . . . . .	30
2.2.1	Kinematik des flexiblen Körpers . . . . .	31
2.2.2	Kinetik des flexiblen Körpers . . . . .	34
2.2.3	Wahl der Ansatzfunktionen . . . . .	37
2.3	Mehrkörpersystem . . . . .	43
2.3.1	Gelenke . . . . .	44
2.3.2	Kinematik der Referenzsysteme . . . . .	45
2.3.3	Minimalform . . . . .	48
2.3.4	Umlenkmechanismen . . . . .	50
2.4	Hydraulische Aktoren . . . . .	52
2.4.1	Hydrauliksystem . . . . .	53
2.4.2	Proportionalventil . . . . .	55
2.4.3	Zylinder . . . . .	56
2.4.4	Schwenkkopf . . . . .	60
2.5	Sensorik . . . . .	63
2.6	Gesamtsystem . . . . .	64
2.6.1	Kopplung der Teilsysteme . . . . .	65
2.6.2	Linearisierung . . . . .	66

2.6.3	Vertikal- und Horizontaldynamik . . . . .	68
2.6.4	Modellreduktion . . . . .	69
2.7	Implementierung . . . . .	75
<b>3</b>	<b>Parameteridentifikation und Modellvalidierung</b>	<b>79</b>
3.1	Parameteridentifikation . . . . .	80
3.1.1	Dämpfung . . . . .	80
3.1.2	Hydraulikkennlinien . . . . .	80
3.1.3	Antriebsdynamik . . . . .	82
3.2	Modellvalidierung . . . . .	83
3.2.1	Zylindersteifigkeit . . . . .	83
3.2.2	Eigenfrequenzen . . . . .	85
3.2.3	Vertikaldynamik . . . . .	86
3.2.4	Horizontaldynamik . . . . .	88
3.2.5	Statische Durchbiegung . . . . .	88
3.3	Zusammenfassung . . . . .	91
<b>4</b>	<b>Aktive Schwingungsdämpfung</b>	<b>93</b>
4.1	Achskompensation . . . . .	94
4.2	Vorsteuerung . . . . .	95
4.2.1	Vorfilter . . . . .	97
4.2.2	Kerbfilter . . . . .	99
4.2.3	Zustandsberechnung . . . . .	101
4.2.4	Messergebnisse . . . . .	101
4.3	Aktor- und Sensorplatzierung für die Regelung . . . . .	107
4.3.1	Aktorplatzierung . . . . .	109
4.3.2	Sensorplatzierung . . . . .	111
4.3.3	Messergebnisse . . . . .	113
4.4	Regelung . . . . .	115
4.4.1	Zustandsregler . . . . .	116
4.4.2	Beobachter . . . . .	117
4.4.3	Implementierung . . . . .	119
4.4.4	Robustheitsuntersuchungen . . . . .	127
4.4.5	Messergebnisse . . . . .	129
4.5	Zusammenfassung . . . . .	134
<b>5</b>	<b>Geometriesteuerung</b>	<b>135</b>
5.1	Aufbau . . . . .	136
5.1.1	Achsregelung . . . . .	137
5.1.2	Kinematisches Modell . . . . .	138
5.1.3	Beschränktes, quadratisches Optimierungsproblem . . . . .	139
5.2	TCP-Steuerungsfunktionen . . . . .	141
5.2.1	Deformationskompensation . . . . .	141

5.2.2	Betriebsmodi . . . . .	144
5.2.3	Gewichtung der TCP-Geschwindigkeit . . . . .	146
5.2.4	Konfigurationssteuerung . . . . .	147
5.3	Beschränkungen im Konfigurationsraum . . . . .	150
5.3.1	Gelenkbeschränkungen . . . . .	150
5.3.2	Volumenstrombeschränkung . . . . .	154
5.3.3	Messergebnisse . . . . .	157
5.4	Beschränkungen im Aufgabenraum . . . . .	161
5.4.1	Kollisionsvermeidung . . . . .	162
5.4.2	Abstandsberechnung . . . . .	166
5.4.3	Hüllvolumen-Approximation . . . . .	169
5.4.4	Ebenenbeschränkungen . . . . .	170
5.4.5	Beschränkungen der Standsicherheit . . . . .	171
5.4.6	Simulationsergebnisse . . . . .	174
5.5	Zusammenfassung . . . . .	181
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>183</b>
<b>A</b>	<b>Anmerkungen zur Notation</b>	<b>187</b>
<b>B</b>	<b>Ergänzungen zur Modellierung des Verteilermasts</b>	<b>189</b>
B.1	Integrale der flexiblen Körper . . . . .	189
B.2	Körperdaten aus FE-Modell . . . . .	190
B.3	Kraftelemente . . . . .	192
B.4	Kinematik der Umlenkmechanismen . . . . .	194
<b>C</b>	<b>Ergänzungen zur Schwingungsdämpfung und Geometriesteuerung</b>	<b>201</b>
C.1	Differenzenmatrix Reglerkennfeld . . . . .	201
C.2	Herleitung Transformationsmatrix Hilfskoordinatensystem . . . . .	202
C.3	Konforme Gelenkpositionsbeschränkung . . . . .	203
	<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>207</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>221</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>223</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>229</b>
	<b>Literatur</b>	<b>231</b>