Steuerungs- und Regelungstechnik

Patric Skalecki

Ganzheitliche Analyse, Modellierung und Digitalisierung der Echtzeitprozesse für die Herstellung von Betonfahrbahnen

Band 66

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Ganzheitliche Analyse, Modellierung und Digitalisierung der Echtzeitprozesse für die Herstellung von Betonfahrbahnen

Von der Fakultät
Konstruktions-, Produktions- und Fahrzeugtechnik
der
Universität Stuttgart

zur Erlangung der Würde eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von

Patric Skalecki
geboren in Schwäbisch Gmünd

Hauptberichter:	Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny
Mitberichter:	Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht

Tag der mündlichen Prüfung: 14. April 2022

Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart

2022

Berichte aus dem
Institut für Systemdynamik
Universität Stuttgart

Band 66

Patric Skalecki

Ganzheitliche Analyse, Modellierung und Digitalisierung der Echtzeitprozesse für die Herstellung von Betonfahrbahnen

D 93 (Diss. Universität Stuttgart)

Shaker Verlag
Düren 2022

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., 2022

Copyright Shaker Verlag 2022
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8856-4
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 • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart. Der Großteil der Untersuchungen wurde im Projekt Betonfahrbahn 4.0 [95] durchgeführt und von der Bundesanstalt für Straßenwesen gefördert.

Die Arbeit während meiner Promotion am Institut habe ich sehr genossen. Sie war geprägt von vielen außerordentlichen und interdisziplinären Herausforderungen, welche eine besondere Motivation und Ausdauer erforderten. Daher möchte ich allen danken, welche mich auf dieser langen Reise begleitet und unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt meinen Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny, der mir durch ein einzigartiges Forschungsumfeld, das entgegengebrachte Vertrauen sowie den notwendigen Freiraum und die gute Betreuung diese Arbeit erst ermöglicht hat. Weiter gilt ebenfalls ein besonderer Dank meinem Mitberichter und dem Projektkoordinator Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht vom Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart. Des Weitern möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende für die Übernahme des Vorsitzes bedanken.

Ebenso gilt ein besonderer Dank allen Projektbeteiligten für den offenen und tatkräftigen fachlichen sowie geselligen Austausch. Insbesondere bedanke ich mich bei der Firma Liebherr-Mischtechnik GmbH mit Dr.-Ing. Mark Wörner, Dr.-Ing. Karl Lukas Knierim, Dr.-Ing. Maximilian Schaut, Reiner Berner und Gerhard Zenne, dass Sie mir neben dem fachlichem Austausch auch den notwendigen Freiraum nach meiner Institutszeit zur Fertigstellung der Promotion ermöglicht haben. Weiter möchte ich mich bei den Firmen Heinz-Schnorpfeil Bau GmbH mit Andreas Tiemann, Thorsten Britz und Daniel Krupa, Otto Alte-Teigeler GmbH mit Tim Alte-Teigeler, Wirtgen GmbH mit Dr.-Ing. Stefan Wagner, Jens Brieskorn und Lothar Schwalbach und Lehmann + Partner GmbH mit Prof. Dr.-Ing. Andreas Großmann und Maximilian Sesselmann bedanken. Bei den Kollegen Dr.-Ing. Oliver Mielich, Dr.-Ing. Frank Lehmann und Michael Schreiner von der Materialprüfanstalt Stuttgart und Simon Hampel und Joshua Nothdurft vom Institut für Werkstoffe im Bauwesen der Universität Stuttgart bedanke ich mich für die tolle Zusammenarbeit. Seitens der Bundesanstalt für Straßenwesen möchte ich mich bei Dr.-Ing. Marco Wieland und Frau Barbara Jungen für die Unterstützung bedanken. Allen hier nicht namentlich angeführten Partner*innen und Kollegen*innen möchte ich hier in gleicher Weise Danken.

Seitens des Instituts möchte ich mich bei allen Kolleg*innen für den sehr guten fachlichen Austausch und das freundliche Miteinander bedanken. Insbesondere bei Dr.-Ing.

Mark Wörner für die Akquise des Betonfahrbahn 4.0 Projektes und die fachliche Einarbeitung am Institut, meinen Bürokollgen Benjamin Schönemann und Boris Blagojevic für die Unterstützung bei zahlreichen Problemen, die interessanten Diskussionen sowie die Einblicke in die Gradientenbetontechnologie. Außerdem möchte ich mich noch bei Sonja Laicher und Sejmir Idrizi für die gute Zusammenarbeit im Rahmen Ihrer Abschlussarbeiten bedanken. Besonders möchte ich mich bei Dr.-Ing. Sabrina Rechkemmer bedanken, dass du mich zu jeder Zeit tatkräftig inhaltlich und moralisch in allen – vor allem den weniger erfreulichen – Phasen der Promotion unterstützt hast. Ebenfalls vielen Dank für die 'netten Ermutigungen' zum Paperschreiben, das seitenweisen Berichtschreiben, die Einblicke in dein Promotionsprojekt und vielem mehr.

Bei Dr.-Ing. Sabrina Rechkemmer, Dr.-Ing. Eckart Arnold und Boris Blagojevic möchte ich mich für das Korrekturlesen meiner Dissertation und die zahlreichen Kommentare und sprachlichen Anmerkungen bedanken. Bei meiner Mutter Astrid Skalecki möchte ich mich für das fachfremde, sprachliche Korrekturlesen bedanken.

Und nicht zuletzt möchte ich mich noch bei meiner Freundin, Familie und Freunden bedanken, dass Ihr mich seelisch und moralisch durch diese Zeit begleitet und mir den notwendigen Rückhalt gegeben habt.

Stuttgart, im November 2022 Patric Skalecki

Kurzfassung

Das Verkehrsinfrastrukturnetz ist das Rückgrat der Wirtschaft. Besonders der Güterverkehr sorgt für eine steigende Belastung der Straßen. Somit erhöht sich der Aufwand für Erhaltungs- und Ausbaumaßnahmen. Dieser Trend ist auch im Bundesverkehrswegeplan 2030 [11] zu beobachten. Ein weiterer zentraler Aspekt der Forschung ist der Ausbau der Digitalisierung im Bauwesen. Vorrangig wird hierbei an der Digitalisierung der Bauplanung und Vorbereitung sowie des Betriebs- und der Zustandserfassung während des Lebenszykluses des Bauwerks gearbeitet. Die Digitalisierung der Echtzeitprozesse während der Bauphase fokussiert sich auf die organisatorischen Abläufe auf der Baustelle und unterliegt der Herausforderung eines Konsortiums aus unterschiedlichen Bauunternehmern. Daher werden Betonautobahnen während der Bauausführung typischerweise in Papierform begleitet. Ein reibungsfreier Ablauf hängt maßgeblich von der guten Kommunikation der Teams vor Ort ab. Ganzheitliche Datenanalysen, der digitale Echtzeitinformationsaustausch sowie der Einsatz von Modellen über die Prozessschrittgrenzen hinweg sind daher üblicherweise in der Baupraxis nicht möglich.

Das Ziel dieser Untersuchung ist es den heutigen Bauprozess unter dem Aspekt der Digitalisierung zu betrachten und gezielt modellbasierte Ansätze abzuleiten, um den Bauprozess zu optimieren. Hierzu wird zunächst der Stand der Technik der Betonfahrbahnherstellung erfasst und analysiert. Darauf aufbauend werden die Echtzeitprozesse sowie die Datenerfassung zum systematischen Aufbau einer ganzheitlichen Datenbasis modelliert. In drei Detailstudien werden exemplarisch weiterführende Konzepte, welche das Potential der Baustelle von morgen beleuchten, präsentiert. Hierbei wird die Signalaufbereitung des Leistungssignals mit einem Beobachter zur Qualitätsüberwachung des Mischprozesses, die Adaption eines verteilt parametrischen Modells und dessen Validierung an einer Laborstudie zur Prädiktion des Abbindeverhaltens von Beton und der Beurteilung der Fahrbahnoberfläche und Schichtdicke anhand von Hochgeschwindigkeits-LiDAR Technologie diskutiert.

Ein weiterer zentraler Aspekt der Digitalisierungsstrategie ist die Neukonzeption und Erprobung eines zentralen Prozessinformationssystems in Echtzeit auf der Baustelle. Hierbei besteht die besondere Herausforderung in der Integration aller Baustellenteilnehmer. Erreicht wird dies über verschiedene Kommunikationsschnittstellen zu allen relevanten Baumaschinen und einer Webapplikation, der *BF4.0 WebApp*. Somit werden alle Prozessdaten in Echtzeit automatisiert erfasst, aufbereitet und dem Baustellenpersonal über den eigenen Prozessschritt hinweg zurückgeführt. Abschließend wird die Qualität der Datenerfassung anhand der Analyse der Materialrückverfolgbarkeit

untersucht. Die Untersuchungen zeigen das Potential der cyber-physikalischen Modelle und ermöglichen ganzheitliche Analysen der Prozessparameter über die gesamte Baustelle. Dadurch können die Prozessabläufe feiner abgestimmt, Fehler systematisch und frühzeitig erkannt sowie die Produktqualität verbessert werden.

Abstract

The transport infrastructure network is the backbone of the economy. In particular, heavy-duty traffic is placing increasing wear and tear on the roads. As a result, the cost of maintenance and expansion continue rising. This trend can be observed in the *Bundesverkehrswegeplan 2030* [11]. Another central aspect of research is the digitalization of the construction industry. During the life cycle of the building, priority is given to the digitization of construction planning and preparation as well as operational and condition monitoring. The digitization of real-time processes during the construction phase focuses on the organizational processes on the construction site and is subject to the challenge of a consortium of different contractors. Therefore, concrete highways are typically accompanied in paper form during construction. A smooth process strongly depends on good communication between the teams onsite. Therefore, holistic data analysis, real-time digital information exchange, and the use of models across process step boundaries are typically not possible in a construction practice.

The aim of this work is to examine the current construction process from an aspect of digitalization and to derive specific model-based approaches in order to optimize the construction process. To that end, the state of the art for concrete pavement construction is first recorded and analyzed. The real-time processes as well as the data acquisition are modeled to systematically build up a holistic database. In three in-depth studies, exemplary further concepts are presented, which illuminate the potential of the construction site of tomorrow. Discussed here are the signal processing of the power signal with an observer for quality monitoring of the mixing process, the adaptation of a distributed parametric model and its validation on laboratory tests for predicting the setting behavior of concrete and the evaluation of the pavement surface and layer thickness using high-speed LiDAR technology.

Another central aspect of the digitalization strategy is the new conception and testing live on the construction site of a central process information system. The particular challenge is the integration of all construction site participants. This is achieved via various communication interfaces to all relevant construction machines and a web application (BF4.0 WebApp). All process data is recorded automatically in real-time, processed and fed back to the construction site personnel across all process steps. Finally, the quality of the data acquisition is examined by analyzing the material traceability. The studies demonstrate the potential of cyber-physical models and enable holistic analyses of process parameters across the entire construction site. As a result,

process sequences can be fine-tuned, errors can be detected systematically and at an early stage, and product quality can be improved.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**
1.1 Betonfahrbahnherstellung 2
1.1.1 Mischprozess und -analyse 4
1.1.2 Betonverhalten während des Hydrierens 5
1.1.3 Digitalisierung im Bauwesen 7
1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit 9

2 Betonfahrbahnherstellung in der Baupraxis **11**
2.1 Betonherstellung 12
2.2 Materiallogistik 15
2.3 Einbau 16
2.4 Nachbearbeitung 19
2.4.1 Sprühen 19
2.4.2 Auskehren 20
2.4.3 Fugenschneiden 22
2.5 Kenngrößen der Fahrbahn 23
2.6 Baustellenmesskampagne 25
2.6.1 Betonherstellung 27
2.6.1.1 Qualitätssicherung des Betonlabors 27
2.6.1.2 Digitalen Lieferscheine der Mischanlage 30
2.6.1.3 Analyse der Mischleistung 39
2.6.2 Materiallogistik 45
2.6.3 Einbau 48
2.6.4 Nachbearbeitung 52
2.7 Herausforderungen an die Digitalisierung der Baustelle 54

3 Prozessinformationssystem und Tools zur Prozessüberwachung **59**
3.1 Ereignisdiskretes Prozessmodell 59
3.2 Aufbereitung der georeferenzierten Information 61
3.2.1 Ereignisdiskrete Datenverarbeitung der Fahrzeugpositionen in der Materiallogistik 61
3.2.2 Transformation der GPS Koordinaten in das lokale Baustellenkoordinatensystem 65
3.2.3 Aufbau eines linearen Koordinatensystems mit GPS Daten . . 68
3.3 Datenmodellierung des zentralen Prozessinformationssystem 70
3.3.1 Datenquellen auf der Baustelle 70

3.3.2 Buchungssystem der Maschinenschnittstellen 75
3.3.3 Datenstruktur der Baustelle 76
3.4 Realisierung des Prozessinformationssystems 78
3.4.1 Konzept und Anforderungen zur Digitalisierung 79
3.4.2 Aufbau der Digitalisierungsinfrastruktur 80
3.4.3 BF4.0 WebApp 82
3.4.4 Manuelle Datenerfassung 83
3.4.5 Buchungssystem der Maschinenschnittstellen 86
3.4.6 Echtzeitübersichten 88
3.4.6.1 Betonherstellung 89
3.4.6.2 Einbau 92
3.4.6.3 Nachbearbeitung 94
3.5 Validierung im baupraktischen Einsatz 96
3.5.1 Nutzerakzeptanz 97
3.5.2 Rückverfolgbarkeit 98
3.6 Cyber-physikalische Modelle 105
3.6.1 Störgrößenbeobachter im Mischprozess 106
3.6.1.1 Einleitung 106
3.6.1.2 Der Doppelwellenmischer 107
3.6.1.3 Beobachterentwurf 111
3.6.1.4 Experimentelle Ergebnisse 116
3.6.1.5 Zusammenfassung 118
3.6.2 Aushärteverhalten von Beton 120
3.6.2.1 Einleitung 120
3.6.2.2 Materialmodell 121
3.6.2.3 Experimentelles Setup 123
3.6.2.4 Parameteridentifikation und Validierung 127
3.6.2.5 Zusammenfassung 131
3.6.3 Beurteilung der Fahrbahnoberfläche und der Schichtdicke anhand von Hochgeschwindigkeits-LiDAR Technologie 133
3.6.3.1 Einleitung 134
3.6.3.2 Messmethode und -analyse 137
3.6.3.3 Ergebnisse 143
3.6.3.4 Zusammenfassung 149

4 Zusammenfassung 151

A Zusätzliche Informationen 155
A.1 Streudiagramm-Matrix der Qualitätssicherung des Betons 155
A.2 Manuelle Eingriffe in die Wasserdosierung 157
A.3 Feuchte Korrektur im Sand 0/4 der BS4 159
A.4 Histogramm des Sandes 0/4 und des Splitts 2/5 der Baustelle BS4 im Unterbeton 161

A.5 Beschreibung der Herstellung einer LKW Ladung 163
A.6 Streudiagramm-Matrix der chargenbezogenen Kennwerte 165
A.7 Beispielanfrage zur Mischanlagen API 168
A.8 Beispielanfrage zur Fertiger API 171
A.9 Datenklassen der Baustelle 174

Abkürzungsverzeichnis **177**

Abbildungsverzeichnis **179**

Literatur **185**