



Steuerung von Tunnelvortriebsmaschinen durch Einsatz eines fuzzy-basierten Expertensystems

Vorgelegte
Dissertation

zur

Erlangung des Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

der

Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der
Ruhr-Universität Bochum

von

Dipl.-Ing. Kai Oberste-Ufer

Bochum, im Oktober 2010

Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau

Herausgeber:
Geschäftsführender Direktor des
Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau
Ruhr-Universität Bochum

Heft 2010-5

Kai Oberste-Ufer

**Steuerung von Tunnelvortriebsmaschinen durch
Einsatz eines fuzzy-basierten Expertensystems**

Shaker Verlag
Aachen 2010

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.: Bochum, Univ., Diss., 2010

Copyright Shaker Verlag 2010

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-9577-6

ISSN 1614-4384

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 in den Jahren 2007 bis 2010 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Ingenieurinformatik der Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften an der Ruhr-Universität Bochum. Die Arbeit beruht auf meiner wissenschaftlichen Tätigkeit im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts „Tunconstruct“. Viele der bei der Bearbeitung des Forschungsprojekts gewonnenen Erkenntnisse sind in diese Arbeit eingeflossen.

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei all denjenigen bedanken, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Allen voran gebührt mein besonderer Dank Herrn Professor Dr.-Ing. Dietrich Hartmann, der mich von Anfang an in meiner Arbeit unterstützt und gefördert hat, und der mir durch viele Anregungen und Ideen neue Denkrichtungen aufgezeigt hat. Ich danke ihm für die ausgezeichnete wissenschaftliche Betreuung und für die persönliche Unterstützung während meines Aufenthaltes an seinem Lehrstuhl. Herrn Professor Dr.-Ing. Markus Thewes danke ich für die Übernahme des Koreferates und dafür, dass er die sehr erfolgreiche Kooperation ermöglichte und förderte. Für seine Tätigkeit als fachfremder Gutachter danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. Scherer.

Für die gute Zusammenarbeit in Tunconstruct und für die Unterstützung bei der Realisation dieser Arbeit danke ich insbesondere Herrn Martin Pfeiffer und Herrn Dominik Kessler. Auch gebührt mein Dank Herrn Dr. Peter-Michael Mayer und Herrn Patrick Hartkorn für ihre Unterstützung beim Einsatz und Test der entwickelten Software.

Darüber hinaus danke ich allen Kollegen am Lehrstuhl für Ingenieurinformatik für ihre Hilfsbereitschaft. Insbesondere möchte ich Ingo Mittrup hervorheben, dem ich für die enge und freundschaftliche Zusammenarbeit in den letzten Jahren danke und der mir bei meiner Arbeit stets konstruktiv und hilfreich zur Seite gestanden ist. Meinen Arbeitskollegen Karlheinz Lehner, Kai Erlemann und Arnim Marx danke ich für die fachlichen Diskussionen, für die Korrekturvorschläge sowie für die vielfältige Unterstützung während der gesamten Zeit.

Mein besonderer Dank gilt meiner Ehefrau Nadine für ihre Geduld und durchgehende Unterstützung während der Fertigstellung dieser Arbeit. Schließlich danke ich vor allem meinen Eltern, die mich immer in jeder Hinsicht unterstützt haben, so dass sie die Voraussetzungen für diese Arbeit geschaffen haben.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	5
1 Einleitung	9
1.1 Motivation	9
1.2 Ziele der Arbeit	12
1.3 Gliederung der Arbeit	13

Abschnitt I Stand der Technik und Innovationsbedarf

2 Schildmaschinen - Überblick und Stand der Technik	17
2.1 Definition und Einordnung	17
2.1.1 Aufbau und Funktionsprinzip von Schildmaschinen	17
2.1.2 Historische Entwicklung der Schildmaschinen	19
2.2 Flüssigkeitsschilde	20
2.2.1 Historische Entwicklung der Flüssigkeitsschilde	21
2.2.2 Konstruktionsvarianten und Merkmale der Flüssigkeitsschilde	21
2.2.3 Einsatzgebiete des Hydroschildes	23
2.3 Weitere Schildtypen	24
2.3.1 Erddruckschilde	25
2.3.2 Offene Schilder	26
2.3.3 Druckluftschilder	26
2.3.4 Sonderformen	27
3 Steuerung, Sensorik und Messtechnik	29
3.1 Speicherprogrammierbare Steuerung (SPS)	30
3.2 Steuerleitsystem (SLS)	30
3.3 Setzungsmessung	32
4 Informationssysteme	33
4.1 System ATDS	33
4.2 System ProCon	34
4.3 System Hydra	35
4.4 System CBP	35
4.5 Bewertung der Informationssysteme	36
5 Innovationsbedarf und Anforderungen	39
5.1 Bedarf an bautechnischen Neuerungen	39
5.1.1 Setzungsminimierter Schildfahrt	39

5.1.2	Unterstützung des Schildfahrers bei der Entscheidungsfindung	40
5.2	Bedarf an informatischen Neuerungen	40
5.2.1	Verbesserungen durch ein fachübergreifendes Interaktions- und Datenmodell	40
5.2.2	Verbesserungen durch eine skalierbare Gesamtsystemlösung	41
5.3	Anforderungen an die Steering-Software	42
5.3.1	Visualisierung / Nutzerführung	42
5.3.2	Flexibilität im Hinblick auf unterschiedliche Datenquellen	42
5.3.3	Echtzeitverarbeitung und Rechenzeitigkeit	43
5.3.4	Modifizierbarkeit, Erweiterbarkeit und Skalierbarkeit	43
5.3.5	Robustheit	44

Abschnitt II Eingesetzte Elemente der Informationstechnik und Lösungskonzept

6	Eingesetzte Elemente der Informationstechnik.	47
6.1	Fuzzylogik	47
6.1.1	Hintergrund	47
6.1.2	Fuzzy-Repräsentation und Fuzzyifizierung	48
6.1.3	Fuzzy-Regeln und fuzzy-basiertes Schließen	49
6.1.4	Defuzzyifizierung	50
6.1.5	Bewertung	51
6.2	Expertensysteme	51
6.2.1	Wissensbasis	52
6.2.2	Inferenzkomponente	52
6.2.3	Inferenz und Fuzzylogik	53
6.3	High Level Architecture (HLA)	53
6.3.1	HLA als Basis eines verteilten Systems	54
6.3.2	Konzepte und Komponenten eines HLA basierten Systems	55
6.3.3	Abgrenzung zur Agententechnologie	58
7	Steering-System als Lösungskonzept	61
7.1	Kernpunkte des Steering-Systems	62
7.2	Ablauf der Implementierung des Steering-Systems	63

Abschnitt III Wissensakquise und Modellierung der Steering-Regeln

8	Wissensakquise für die Maschinensteuerung	67
8.1	Setzungen infolge Schildfahrt	67
8.1.1	Setzungen im Bereich des Schneidrades (Bereich 1)	69
8.1.2	Setzungen im Bereich des Schildes (Bereich 2)	69
8.1.3	Setzungen im Bereich der Ringspaltverpressung (Bereich 3)	70
8.1.4	Nachfolgende Setzungen (Bereich 4)	70
8.2	Beeinflussung der Setzungen	71
8.2.1	Setzungsbeeinflussung im Bereich des Schneidrades	71
8.2.2	Setzungsbeeinflussung im Bereich des Schildes	71
8.2.3	Setzungsbeeinflussung im Bereich der Ringspaltverpressung	71
8.2.4	Beeinflussung im Bereich der nachfolgenden Setzungen	72
9	Maschinensteuerung mit Fuzzy-Regeln	73
9.1	Fuzzy-Repräsentation der Eingangsgrößen	73

9.1.1	Eingangsgröße Verpressdruck	74
9.1.2	Eingangsgröße Stützdruck	76
9.1.3	Eingangsgröße Beziehung Verpressdruck-Stützdruck	78
9.1.4	Eingangsgröße Setzungen	80
9.2	Fuzzy-Repräsentation der Ausgangsgröße Druckänderung	83
9.3	Inferenzregeln	84
9.3.1	Regelgruppe 1: Auswertung des Verpressdrucks	85
9.3.2	Regelgruppe 2: Auswertung des Stützdrucks	85
9.3.3	Regelgruppe 3: Auswertung der Beziehung Verpressdruck-Stützdruck	86
9.3.4	Regelgruppe 4: Auswertung der Setzungen	87
9.3.5	Regelgruppe 5: Meta-Regeln zur Konfliktauflösung	87
9.4	Verarbeitung der Steering-Regeln im Expertensystem	88

Abschnitt IV Prototypische Implementierung der Steering-Software

10	Übersicht über die Steering-Software	93
10.1	HLA als Middleware der Steering-Software	93
10.2	Komponentenbasierter Ansatz der Steering-Software	94
11	Implementiertes Objekt- und Interaktionsmodell der Steering-Software	99
11.1	Implementierung der SPS-Daten	100
11.2	Implementierung der SLS-Daten	101
11.3	Implementierung der Monitoring-Daten	102
11.4	Implementierung der Steueranweisungen	103
11.5	Implementierung der Setzungsmulde	103
11.6	Implementierung der Entwurfsdaten	104
11.7	Implementierung der geographische Koordinaten	106
11.8	Implementierung der Interaktionsnachrichten	107
11.9	Implementierung der Protokollaten	108
12	Implementierung der Steering-Komponenten	111
12.1	Implementierung der SPS-Komponente	111
12.2	Implementierung der SLS-Komponente	113
12.3	Implementierung der Monitoring-Komponente	114
12.4	Implementierung der Expertensystem-Komponente	115
12.5	Implementierung der Protokoll-Komponente	117
13	Graphische Benutzerschnittstelle (GUI)	119
13.1	Eclipse Rich Client Plattform als Basis der GUI	119
13.2	Datenvisualisierung	120
13.3	Anzeige protokollierter Daten	122

Abschnitt V Verifikation, Validierung und Anwendung der Steering-Software

14	Verifikation: Systemverhalten in ausgewählten Situationen	127
14.1	Beispiel 1: Plötzlicher Stützdruckabfall	127
14.2	Beispiel 2: Anstieg Verpressdruck	128
14.3	Beispiel 3: Setzungen an der Oberfläche	129
15	Validierung und Anwendung: U-Bahnlinie U4 Hamburg	131
15.1	Projektinformationen zur U-Bahnlinie U4	131

15.2 Bestehende Daten- und Kommunikationsinfrastruktur	133
15.3 Programmausführung und Ergebnisse	134
16 Ausblick	137
Anhang	139
Literatur	147
Abbildungen	155
Tabellen	157