

Dipl.-Ing. Christian Telke

Entwicklung eines universellen modularen Messsystems für den Entwicklungszyklus von leichten Stadt-, Straßen- und U-Bahn- fahrzeugen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

**Entwicklung eines universellen modularen
Messsystems für den Entwicklungszyklus von
leichten Stadt-, Straßen- und
U-Bahnfahrzeugen**

Dipl.-Ing. Christian Telke
geboren am 26. April 1986 in Schlema

der Fakultät Maschinenwesen der Technischen Universität Dresden

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktoringenieurs
(Dr.-Ing.)

angenommene Dissertation

Tag der Einreichung: 09. Oktober 2017
Tag der Verteidigung: 20. Juli 2018

Gutachter:
Prof. Dr.-Ing. Michael Beitelschmidt
Prof. PhD DSc Grzegorz Litak

(Technische Universität Dresden)
(Lublin University of Technology)

Messtechnik und Sensorik

Christian Telke

**Entwicklung eines universellen modularen
Messsystems für den Entwicklungszyklus von
leichten Stadt-, Straßen- und U-Bahnfahrzeugen**

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2018

Copyright Shaker Verlag 2018

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6133-8

ISSN 1610-4773

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

Das Vorhaben Dissertation ist nunmehr abgeschlossen. Bevor ich mich anschließend in fachlichen Ausführungen meiner Thematik verliere, möchte ich diese Gelegenheit nutzen und ein paar persönliche Worte formulieren. Auch wenn die Arbeit nur den Namen eines Autors trägt, gebührt den vielen, die zu dem Entstehen dieser Dissertation ihren Beitrag geleistet haben, eine Würdigung an dieser Stelle.

Ich möchte zuerst meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Beitelschmidt, danken, der mir während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Dynamik und Mechanismentechnik an der TU-Dresden nicht nur ein außerordentlich fairer Vorgesetzter, sondern auch immer ein kompetenter Ansprechpartner für die Belange dieser Dissertation war. Ich danke Ihm für die zahlreichen fruchtbaren Diskussionen und Anregungen.

Weiterhin möchte ich den Herren Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Scheffler, Herrn Dipl.-Ing. Marian Partzsch und Herrn Dipl.-Ing. Sten Urban sowie Herrn Dipl.-Ing. Johannes Stier für die zahlreichen Denkanstöße, Diskussionsrunden und für die wunderbare Bürogemeinschaft danken. Die Zeit, die wir während meiner Tätigkeit an der TUD zusammen verbrachten, schätze ich sehr. Viele Eurer Anregungen sind in die Arbeit eingeflossen - danke!

Für die zahlreichen fachlichen Gespräche zur Bewältigung der Theorie der fraktionalen Ableitungen sowie für die Übernahme der Begutachtung möchte ich Herrn Prof. PhD DSc Grzegorz Litak danken. Nicht unwesentlich an der Entstehung dieser Arbeit und den damit in Verbindung stehenden Patenten sind die Herren Dr.-Ing. Matthias Harter, Dr.-Ing. Gero Zechel sowie Dipl.-Ing. (FH) Marcel Dinter sowie BOMBARDIER-Transportation beteiligt. Ich möchte allen für die Unterstützung und für die zahlreichen fachlichen Diskussionen und Inspirationen danken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Scheffler und Herrn Dr.-Ing. Volker Quarz danke ich für die kritische Durchsicht des Manuskripts und für die zahlreichen Hinweise und fachlichen Anregungen.

Ich danke meiner Familie und meinen Freunden für die Geduld und den Rückhalt und für das Verständnis während der Entstehung dieser Arbeit. Insbesondere meiner Partnerin Monique Stefan gilt besonderer Dank für die wunderbaren Momente außerhalb des Projektes Dissertation. In diesen Momenten wurde mir oftmals wieder klar, dass es auch eine Umwelt außerhalb von Punktwolken, Belegungsrastern und Bilddaten gibt. Ebenfalls möchte ich Ihr für das Korrekturlesen des vorliegenden Werkes danken.

Der vorliegenden Arbeit ist eine langjährige Studienzeit, welche mir durch die Unterstützung meiner Eltern ermöglicht wurde, vorausgegangen. Ich möchte mich an dieser Stelle für das Vertrauen herzlich bedanken.

Chemnitz, im Juli 2018

meinen Eltern und Großeltern

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	III
Inhalt	VIII
Abkürzungsverzeichnis	IX
Formelzeichen	XI
1 Einleitung	17
1.1 Einleitung, Motivation und Zielstellung	17
1.2 Aufbau der Arbeit	19
1.3 Literaturüberblick	20
1.4 Abgrenzung der Arbeit	26
2 Theoretische Grundlagen	27
2.1 Allgemeine Grundlagen	28
2.1.1 DUHAMEL-Integral und diskrete Faltung	28
2.1.2 Wavelet-Transformation	28
2.1.3 HILBERT-Transformation	30
2.1.4 WIGNER-VILLE-Verteilung	32
2.2 Fraktionale Ableitungen	33
2.2.1 GRÜNWARD-LETNIKOV-Definition	34
2.2.2 RIEMANN-LIOUVILLE-Definition	36
2.2.3 Äquivalenz der Definitionen	37
2.2.4 Alternative Definitionen	38
2.2.5 Eigenschaften fraktionaler Ableitungen	39
2.3 Digitale Bild- und Signalverarbeitung - Variationsansätze	41
2.3.1 Glättungsfiler: Fraktionale Anisotrope Diffusion (FAD)	41
2.3.2 MUMFORD-SHAH-Funktional	45
2.4 RADON-Transformation	46
2.4.1 Grundlagen	46
2.4.2 FOURIER-Slice- bzw. Zentralschnitttheorem	47
2.4.3 Extraktion der Geradengleichung	49
2.5 Progressive Probabilistische HOUGH-Transformation (PPHT)	50
2.6 Objektklassifizierung mittels Boosting	50
2.6.1 AdaBoost - Theoretische Grundlagen	51
2.6.2 Fehleranalyse	51
2.6.3 Echtzeit Objektklassifizierung - Klassifiziererkaskade	53
2.7 Rekursiver Least-Squares-Schätzer	56
2.8 KALMAN-Filter	58
3 Kantendetektion auf Basis fraktionaler Ableitungen	61
3.1 Grundsätzliches	61
3.2 Anwendung von Filterkernen auf Bilddaten - Diskrete Faltung	62

3.3	Alternative Ansätze	63
3.3.1	MUMFORD-SHAH-Funktional	63
3.3.2	Fraktionale HILBERT-Transformation	65
3.4	Fraktionale Ortsableitungen und Filterkerne	68
3.5	Contour Robuste d'Ordre Non Entier (CRONE)	69
3.5.1	Herleitung der CRONE-Gleichungen	70
3.5.2	Erweiterung des CRONE-Operators auf zwei Dimensionen	73
3.5.3	Anwendung des CRONE-Operators auf synthetische Flächendaten	76
3.6	Extended Contour Robuste d'Ordre Non Entier	78
3.6.1	Herleitung der eCRONE-Gleichungen	79
3.6.2	Anwenden des eCRONE-Operators auf synthetische Flächendaten	80
3.6.3	Ordnungsfunktion $\nu(n)$	81
3.6.4	Anwendung des eCRONE-Operators mit Ordnungsfunktion	84
3.7	Richtung der Ableitungsoperation	86
3.8	Anwendung auf reale Bilddaten	88
4	Universelles modulares Messsystem UMMS	91
4.1	Anforderungen, Messgrößen und Einführung	91
4.2	Definition der zu erfassenden Messgrößen	92
4.2.1	Gleislagegrößen	93
4.2.2	Verfügbarer Lichtraum	98
4.3	Konzept	99
4.3.1	Komponenten	99
4.3.2	Modularität	100
4.4	Hardwaretechnische Umsetzung	102
4.4.1	Track Measurement System (TMS)	102
4.4.2	Lichtraummesssystem (CMS)	104
4.4.3	Schnittstellen, Systemaufbau und Sensorkommunikation	105
4.5	Koordinatensysteme und Transformationen - TMS	106
4.5.1	Ortsvektor - Schienenquerschnitt	106
4.5.2	Ortsvektor - Bildkoordinatensystem der Kamera	109
4.6	Koordinatensysteme und Transformationen - CMS	110
4.7	Sensorträgernachführung	112
4.7.1	Schienenprofilposition auf Basis der Profils Scannerdaten	114
4.7.2	Schienenprofilposition mittels Kameradaten	122
4.7.3	Zustandsmaschine zur Systemsteuerung	132
5	Erfassung und Aufbereitung der Messgrößen	135
5.1	Erfassung der Gleislage	135
5.1.1	Geodätische Transformationen und Raumkurve	135
5.1.2	Erfassung der Spurweite	137
5.1.3	Erfassung des Gleismittensystems	142
5.1.4	Spurweitenmessfehler und reale Gleismitte	142
5.2	Auswertung der Gleislagedaten	143
5.2.1	Horizontal- und Vertikalkrümmung sowie Überhöhung	144
5.2.2	Schätzung der spektralen Dichte	145
5.2.3	Behandlung von Ausreißern und Messfehlern	152
5.3	Erfassung der Lichtraumgrenzungslinie	155
5.3.1	Grundsätzliche Betrachtungen	155
5.3.2	Korrespondenzproblem und Belegungsraaster	156
5.3.3	Orthogonalprojektion auf Belegungsraaster	159
5.4	Auswertung der Lichtraumdaten	160

5.4.1	Hüllkurvenbasierte Lichtraumauswertung mit Indikatorfunktion	161
5.4.2	Konzept: Identifikation von Objekten ohne Lichtraumrelevanz	163
5.5	Softwaretechnische Umsetzung	164
6	Reale Messung, Ergebnisse und Validierung	171
6.1	Trägerfahrzeug, Teststrecke und Hardware-Konfiguration	171
6.1.1	Trägerfahrzeug, Teststrecke und Referenzdaten	171
6.1.2	Hardwarekonfiguration - TMS	173
6.1.3	Kalibrierung der Spiegelgeometrie	175
6.1.4	Hardwarekonfiguration - CMS	176
6.1.5	Trägerfahrzeuggeschwindigkeit, Wegkoordinaten	178
6.2	Ergebnisse - Gleislagegrößen	178
6.2.1	Spurweite und Überhöhung - Ergebnisse und Validierung	178
6.2.2	Horizontal- und Vertikalkrümmung - Ergebnisse und Validierung	182
6.2.3	Sensorträgernachführung - Ergebnisse	187
6.3	Ergebnisse - Erfassung des Lichtraums	191
6.3.1	Punktewolke, Fahrzeugumfeld und Trassierungsbezug	191
6.3.2	Volume of Interest, Belegungsraaster und Lichtraumumgrenzungslinie	193
6.3.3	Validierung der Ergebnisse	194
6.4	Fehlerdiskussion und -abschätzung	204
6.5	Zusammenfassung, Fazit und weiteres Vorgehen	210
7	Zusammenfassung und Ausblick	213
	Literaturverzeichnis	219
	Abbildungsverzeichnis	233
	Tabellenverzeichnis	243
A	Anhang	245
A.1	Algorithmus: PPHT	245
A.2	Algorithmus: AdaBoost 1	246
A.3	Algorithmus: AdaBoost 2	247
A.4	Rekursive Berechnung der GRÜN WALD-Koeffizienten	247
A.5	Fractionale Ableitung, Lage der Wendestelle	248
A.6	Antriebsregler, Umrichter SPS und zentrale Bedieneinheit	249
A.7	Lichtraumdefinition	249
A.8	MKS-Modell der Dresdner Messstraßenbahn	252
A.9	Benutzerspezifisches Eingabealphabet	253
A.10	Prozessimmanentes Eingabealphabet	254
A.11	Algorithmus zur Berechnung der Zellenwerte des OG	255
A.12	Ausreißerbehandlung mit Despiking-Verfahren	256
A.13	Konfigurationsparameter des TMS	257
A.14	Konfigurationsparameter des CMS	257
A.15	Filterung der Profildaten	258
A.16	Messgenauigkeiten der verwendeten Inertialplattform	259
A.17	Abtastfrequenzen UMMS-Sensorik	259
A.18	Krabbe-Rohdaten	260
A.19	Rohdaten der UMMS-Messung	262
A.20	Kalibriergeometrie zur Kalibrierung der TMS-LASER-Sensorik	263
A.21	Messgenauigkeiten der verwendeten LASER-Sensorik	264
A.22	Auszug Benutzerhandbuch, TMS-Kamerasensorik	266

A.23 Auszug Benutzerhandbuch, TMS-Kamerasensorik, Objektiv	266
A.24 Detaillierte Lage eines VOI innerhalb der PCL-Daten	267
A.25 Werkzeug zur Erstellung synthetischer Trainingsdaten und Testdatensätze	268
A.26 PDF und CDF, 100000 Samples	270
A.27 Wahrscheinlichkeitsnetze	271
A.28 Externe Bibliotheken für die Umsetzung der UMMS-Software	272