

# Entwurf und Realisierung eines modulbasierten Fahrtführungssystems für autonome Fahrzeuge

## Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

vorgelegt der  
Fakultät für Informatik und Automatisierung  
der Technischen Universität Ilmenau

von

**Dipl.-Ing. Fabian Müller**

geboren am 04.04.1980 in Sonneberg

Gutachter:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph Ament  
(TU Ilmenau)
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Georg Bretthauer  
(Karlsruher Institut für Technologie (KIT))
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Wernstedt  
(Fraunhofer Anwendungszentrum für Systemtechnik (AST) des IOSB, Ilmenau)

Tag der Einreichung: 19. März 2012

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 28. September 2012



Berichte aus der Automatisierungstechnik

**Fabian Müller**

**Entwurf und Realisierung eines modulbasierten  
Fahrerführungssystems für autonome Fahrzeuge**

Shaker Verlag  
Aachen 2012

**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.: Ilmenau, Techn. Univ., Diss., 2012

Copyright Shaker Verlag 2012

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-1551-5

ISSN 0945-4659

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

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

# Kurzfassung

In dieser Arbeit wird ein neues Konzept eines modulbasierten Fahrtführungssystems entwickelt und prototypisch umgesetzt. Autonome Fahrzeuge sollen sich in ihrer Umgebung zielgerichtet bewegen, um eine gestellte Aufgabe bzw. Mission erfüllen zu können. Beispiele sind Anwendungen in den Bereichen Logistik, Straßenverkehr und Sicherheit, die jeweils unterschiedliche Anforderungen an ein Fahrtführungssystem, als Gesamtheit der Komponenten zur Sensordatenerfassung sowie zur Planung und Regelung, stellen. Das vorgestellte Fahrtführungssystem zeichnet sich in einer neuartigen Form durch eine modulbasierte Architektur aus. Hierbei werden bestimmte Funktionen in deren algorithmischer Beschreibung zusammen mit ggf. notwendiger Sensorik in der Umsetzung auf speziellen Rechereinheiten zu Modulen zusammengefasst. Die Module ermöglichen die Realisierung eines flexiblen und entwicklungsfähigen Konzeptes der Fahrtführung autonomer Fahrzeuge, welches erstmals in dieser Form für das Test- und Entwicklungssystem „Quanjo TDS“ demonstriert wurde.

Als Basismodule der Fahrtführung wurden die Module „Lokalisierung“, „Umgebungserfassung“, „Autonome Wegpunktfahrt“ und „Fahrzeugschnittstelle“ definiert und prototypisch realisiert. Durch das Modul „Lokalisierung“ werden die Daten eines satellitenbasierten Positionsbestimmungssystems (Stützsystem) mit den Daten von Sensoren zur Messung von relativen Bewegungsgrößen fusioniert, um die Verfügbarkeit und die Datenrate der Positionsinformation zu erhöhen. Zu diesem Zweck wurde ein Positionsfilter auf Basis des Erweiterten Kalman-Filters entwickelt. Kurzzeitige Störungen, die durch Abschattung oder Mehrwegeausbreitung des Satellitensignals entstehen können, werden durch das Modul „Lokalisierung“ auf diese Weise reduziert. Das Modul „Umgebungserfassung“ detektiert die Objekte der Umgebung, welche für die Fahrtführung relevant sind und generiert eine kompakte Beschreibung der Umgebungssituation. Durch das Modul „Autonome Wegpunktfahrt“ werden für die Funktion der autonomen Anfahrt von definierten Positionen die entsprechenden Komponenten der Planung und Regelung ausgeführt. Hierbei wird die Positionsinformation und die Information über die Umgebung verwendet, um einen hindernisfreien Pfad zur Zielposition über eine Reihe von Wegpunkten zu planen und autonom abzufahren, wobei bei dynamischen Umgebungen Umplanungen notwendig sein können. Die Fahrzeugschnittstelle dient der Generierung der fahrzeugspezifischen Stellkommandos hinsichtlich der Aktorik.



# Abstract

This thesis presents a new concept of a driving control system for autonomous vehicles with its prototype realization. Autonomous vehicles are meant to move in their environments in a desired way, to be able to fulfil a specific task or mission. Application examples of autonomous vehicles can be found in logistics, road traffic and security, which have different demands on the driving control system, which is defined as the entity of components regarding sensor data acquisition and planning/control. The presented driving control system is characterized by its module-based architecture. Hereby, the algorithms, the data processing hardware and sensory components (if any) related to specific (autonomous) functions are combined to modules. The modules facilitate the realization of a flexible and extendable concept of driving control of autonomous vehicles, which is demonstrated for the first time in this form for the test- and development system „Quanjo TDS“.

The basic modules of the driving control system are defined as „localization“, „environment perception“, „autonomous waypoint driving“, and „vehicle interface“. The module „localization“ is for providing a quasi-continuous position information by fusing the data of a satellite-based global position system (e. g. GPS) with the data from sensors for measuring relative position information (e. g. inertial measurement unit). By using an Extended Kalman-Filter for developing a special position filter, short-time errors due to shadowing or multi-path propagation of the satellite-signal are tackled. The module „environment perception“ detects objects, which are relevant for the driving control, within the environment and generates a compact description of the detected objects. The module „autonomous waypoint driving“ implements the function of autonomously driving to desired positions within the environment. For this, the position information and the information about the detected objects are used to plan a hindrance-free path to the target position. This path is represented by a sequence of intermediate waypoints, whereas replanning becomes necessary in dynamic environments. The module „vehicle interface“ generates the vehicle specific control commands of the vehicle actuator system.



# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fraunhofer Anwendungszentrum für Systemtechnik (AST) in Ilmenau des Instituts für Optoelektronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB). In der Umsetzung von sowohl industrienahen als auch öffentlich geförderten Projekten, hatte ich in dieser Zeit die Gelegenheit, Module für autonome Fahrzeuge zu entwickeln und umzusetzen. Der Fokus meiner Forschungsarbeit am AST seit dem Jahr 2006 war die Thematik der autonomen Fahrzeuge für den Einsatz im Gelände. Zu diesem Zeitpunkt lag bereits ein Fundament bestehend aus Arbeiten in Kooperation mit dem Fachgebiet „Systemanalyse“ der TU Ilmenau sowie entsprechenden Versuchsträgern (Kleinroboter und maritime Fahrzeuge) vor. In einem Team aus Ingenieuren und Studenten war ich von 2007 bis 2008 an der Realisierung eines neuen Test- und Demonstrationssystems (TDS) zur Entwicklung von Technologien für autonome Fahrzeuge beteiligt. Die Basis bildete hierbei eine hybrid angetriebene Fahrzeugplattform mit „drive-by-wire“-Steuerung.

Dieses Test- und Demonstrationssystem „Quanjo TDS“ wurde 2008 in Kooperation mit einem Industriepartner auf der „M-ELROB“-Leistungsschau in Hammelburg vorgestellt. Des Weiteren konnte ich die Entwicklung von Konzepten für autonome Fahrzeuge, mit Fokus auf Sicherheitsaufgaben, während meiner Besuche der „M-ELROB“-Leistungsschau in den Jahren 2006 und 2010 verfolgen. Meine Arbeit an Teillösungen für autonome Fahrzeuge und die Analyse der „M-ELROB“ vor Ort ergab, dass die Nutzung von Standard-PC-Hardware zur Realisierung von Steuerungslösungen für autonome Fahrzeuge die Nachteile der Kopplung an die Eigenschaften der Betriebssysteme und Programmentwicklung mit sich bringt. Daraus resultierte die Idee, ein modulbasiertes, eingebettetes Fahrtführungssystem für autonome Fahrzeuge zu entwickeln. Das in dieser Arbeit entwickelte Fahrtführungssystem stellt gegenwärtig die Grundlage für mehrere laufende Industrie- und Forschungsprojekte dar.

Mein Dank für das Interesse und die konstruktive Begleitung meiner Arbeit gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Christoph Ament. Die Diskussionen mit ihm und seine Anmerkungen haben wertvolle Impulse zur Gestaltung der Arbeit gegeben. Ich danke Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Jürgen Wernstedt, der mir die Möglichkeit gegeben hat, an diesem Thema zu arbeiten und mich während der Wegstrecke über Ratschläge hinaus stets unterstützt hat. Dies gilt ebenfalls für Prof. Dr.-Ing. Andreas Wenzel, der die Zielstellung mit Interesse aktiv mitgetragen hat und als Leiter der Gruppe Eingebettete Systeme verantwortlich für die Entwicklung des Test- und Demonstrationssystems „Quanjo TDS“, als technische Grundlage meiner Arbeit, war. Des Weiteren möchte ich mich für die Durchsicht des Manuskripts meiner Arbeit bei ihm bedanken. Ebenfalls für die Durchsicht des Manuskripts danke ich Herrn Dr.-Ing. Hartmut Linke. Schließlich danke ich Herrn Dipl.-Medienwiss. Martin Käßler für die Überführung meiner Gedankenskizze zum Entwurf des Positionsfilters in eine Computerillustration.

---

Die Arbeit an (teil)autonomen Fahrzeugen ist interdisziplinär. Meine Wertschätzung gilt vor allem der Arbeit von Herrn Dipl.-Ing. Achim Gehr, Dipl.-Ing. Frank Weichert, Dipl.-Ing. André Weiskopf und Dipl.-Ing. Christoph Eisenhut, die die Konstruktion sowie die elektrischen und elektronischen Arbeiten am Test- und Demonstrationssystem „Quanjo TDS“ vorgenommen haben. Zahlreiche Realisierungsaufgaben waren Grundlage von studentischen Arbeiten, ob als Hiwi-Tätigkeit oder als studiumsbezogene Projekt- bzw. Abschlussarbeiten. Gerne möchte ich diesbezüglich hier die besondere Leistung von Herrn Peter Rudolph und Marc Etzhold erwähnen.

Mein aufrichtiger Dank und meine Anerkennung gilt meinen Eltern Roland und Barbara Müller, für das was sie auf ihren Lebensweg bisher geleistet und was sie mir auf meinem Weg gegeben haben sowie für Ihre große Unterstützung über die Jahre hinweg. Für ihre Motivation und Anteilnahme möchte ich in diesem Zusammenhang ebenfalls meiner Schwester Miriam danken. Meiner Freundin Stephanie gilt mein Dank, über das viele Korrekturlesen und das Bearbeiten von Grafiken hinaus, für ihre liebevolle Erinnerung an die wichtigen Dinge im Leben und ihr Verständnis besonders während des Schreibens der Arbeit.

Ilmenau, den 18. Dezember 2012

Fabian Müller

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis . . . . .	viii
Tabellenverzeichnis . . . . .	xii
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ausgangspunkt . . . . .	1
1.2 Stand der Technik . . . . .	6
1.3 Zielstellung und Aufbau der Arbeit . . . . .	10
1.4 Test- und Demonstrationssystem „Quanjo TDS“ . . . . .	12
<b>2 Konzept der modulbasierten Fahrtführung</b>	<b>17</b>
2.1 Einführung . . . . .	17
2.1.1 Zielstellung . . . . .	17
2.1.2 Fahrtführungssysteme für autonome Fahrzeuge . . . . .	18
2.1.3 Aufbau und Realisierung von autonomen Fahrzeugen . . . . .	20
2.2 Szenarien zum Einsatz autonomer Fahrzeuge . . . . .	22
2.3 Notwendige Fähigkeiten zur Fahrtführung . . . . .	24
2.4 Entwurf des neuen Fahrtführungssystems . . . . .	29
2.5 Module der Fahrtführung . . . . .	31
2.5.1 Lokalisierung und Umgebungserfassung . . . . .	31
2.5.2 Missionsumsetzung . . . . .	32
2.5.3 Fahrzeugschnittstelle . . . . .	33
2.6 Kommunikation zwischen den Modulen . . . . .	34
2.7 Echtzeitfähige Datenerfassung mehrerer Sensoren . . . . .	35
2.8 Verhalten bei Komponentenausfall . . . . .	36
2.9 Prototypische Realisierung . . . . .	37
<b>3 Entwicklung der Teilmodule zur Fahrtführung</b>	<b>39</b>
3.1 Einführung . . . . .	39
3.2 Modul: Lokalisierung . . . . .	40
3.2.1 Konzept des Positionsfilters . . . . .	40
3.2.2 Koordinatensysteme der Navigation . . . . .	43
3.2.3 Verwendete Sensortechnologien . . . . .	46
3.2.4 Beschreibung des Erweiterten Kalman-Filter . . . . .	58
3.2.5 Stand der Technik . . . . .	63
3.2.6 Entwickelte Verarbeitungsstruktur . . . . .	64
3.2.7 Modellbildung . . . . .	69
3.2.8 Adaption des Positionsfilters . . . . .	73
3.3 Modul: Umgebungserfassung . . . . .	73
3.3.1 Verfügbare Sensortechnologien . . . . .	74

3.3.2	Stand der Technik . . . . .	77
3.3.3	Umgebungserfassung mit ToF-Kameras . . . . .	79
3.3.4	Umgebungserfassung mit Laserscannern . . . . .	87
3.3.5	Integration der Sensoren in die Fahrzeugplattform . . . . .	90
3.4	Modul: Autonome Wegpunktfahrt . . . . .	92
3.4.1	Stand der Technik . . . . .	92
3.4.2	Wegpunktplanung . . . . .	94
3.4.3	Wegpunktregelung . . . . .	99
3.4.4	Ausweichsteuerung . . . . .	100
3.4.5	Fahrzeugregelung . . . . .	105
3.5	Interaktion der Module . . . . .	112
3.6	Realisierung der Module . . . . .	113
<b>4</b>	<b>Test des Fahrtführungssystems</b>	<b>117</b>
4.1	Test in der Simulationsumgebung . . . . .	117
4.1.1	Modul: Autonome Wegpunktfahrt . . . . .	119
4.1.2	Gesamtsystem . . . . .	122
4.2	Test in Fahrversuchen . . . . .	124
4.2.1	Modul: Lokalisierung . . . . .	125
4.2.2	Modul: Umgebungserfassung . . . . .	126
4.2.3	Gesamtsystem . . . . .	129
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>131</b>
5.1	Zusammenfassung . . . . .	131
5.2	Ausblick . . . . .	133
<b>A</b>	<b>Koordinatentransformationen</b>	<b>137</b>
<b>B</b>	<b>Teststrecke</b>	<b>141</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>143</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	„Beagle 2“ Lander der ESA . . . . .	3
1.2	„Mars Rover“ der NASA . . . . .	3
1.3	Mobiler Roboter „Shakey“ . . . . .	4
1.4	Mobiler Roboter „Flakey“ . . . . .	4
1.5	Mobiler Roboter „Care-O-Bot 3“ . . . . .	4
1.6	Einteilung der mobilen Roboter bzw. Fahrzeuge nach dem Grad der Selbstständigkeit und den Anforderungen der Umgebung . . . . .	5
1.7	Siegerfahrzeug „Boss“ der DARPA „Urban Challenge“ . . . . .	7
1.8	Rechnertechnik im Heck des Fahrzeuges „Boss“ . . . . .	7
1.9	Fahrzeug „Gecko“ des Teams „Base-10“ . . . . .	8
1.10	Fahrzeug „MuCar-3“ der Universität der Bundeswehr . . . . .	8
1.11	Entwicklungs- und Versuchsplattform „Quanjo TDS“, Foto: Fraunhofer AST . . . . .	12
1.12	Energiefluss beim Fahrzeug „Quanjo TDS“ . . . . .	13
1.13	Steuerfluss bei der Ansteuerung der Antriebsmotoren . . . . .	15
2.1	Unterschied von Automationslösungen und intelligenten mobilen Systemen . . . . .	20
2.2	Vorgehen zum Entwurf und zur Realisierung autonomer, mobiler Systeme . . . . .	21
2.3	Eigenschaften ausgewählter Einsatzszenarien zur Anwendung autonomer, mobiler Systeme . . . . .	24
2.4	Wesentliche Fähigkeiten innerhalb der Fahrtführung autonomer, mobiler Systeme . . . . .	25
2.5	Datenverarbeitungskette der maschinellen Bildverarbeitung . . . . .	27
2.6	Intelligente Fahrzeugführung als Regelkreis . . . . .	30
2.7	Struktur des modulbasierten Fahrtführungssystems für autonome, mobile Systeme . . . . .	31
2.8	Struktur des Moduls „Missionsumsetzung“ . . . . .	32
2.9	Ablaufplan der Kommunikationsbehandlung innerhalb des Moduls „Fahrzeugschnittstelle“ für Missionen mit ständigem Funkkontakt zum Fahrtführungssystem . . . . .	33
2.10	Prinzip der gleichzeitigen Erfassung von Sensordaten am Beispiel zweier Sensoren <i>S1</i> und <i>S2</i> . . . . .	36
3.1	Darstellung der Ausgangssituation als Strukturbild. . . . .	39
3.2	Systemmodellierung zum Entwurf des Positionsfilters . . . . .	41
3.3	Erdellipsoid des WGS-84 Kartendatums mit dem „Earth Centered, Earth Fixed“ (ECEF) Koordinatensystem . . . . .	44
3.4	Veranschaulichung der verschiedenen Höhenangaben bezogen auf den Erdellipsoiden und den Geoiden . . . . .	44
3.5	Koordinatensysteme der Navigation . . . . .	45
3.6	Verkettung der Koordinatensysteme der Navigation . . . . .	47

3.7	Positionssignale eines RTK-Empfängers (GPS-Referenz) und eines Standard-Empfängers (GPS) bei einer Testfahrt . . . . .	50
3.8	Abweichung zwischen den beiden Positionssignalen eines RTK-Empfängers (GPS-Referenz) und eines Standard-Empfängers (GPS) bei einer Testfahrt . . . . .	51
3.9	IMU mit sensoreigenem Koordinatensystem $U$ . . . . .	52
3.10	Veranschaulichung des Effekts des Scheinlots bei beschleunigter Fahrt . . . . .	53
3.11	Testversuch zum Scheinlot (Laborszenario) Beschleunigung $a_x$ in x-Richtung und Pitch-Winkel $\theta_F$ . . . . .	54
3.12	Testversuch zum Scheinlot (realistisches Szenario) Beschleunigung $a_x$ in x-Richtung und Pitch-Winkel $\theta_F$ . . . . .	54
3.13	Prinzip der Messung der „Geschwindigkeit über Grund“ mittels zweier Radar-Sensoren in Janus-Konfiguration . . . . .	55
3.14	Veranschaulichung der magnetisch gemessenen Winkelgrößen bezogen auf das NED-System $N_G$ . . . . .	56
3.15	Unterschiedliche Bezugssysteme und Wertebereiche bei der Angabe von Winkelgrößen . . . . .	58
3.16	Allgemeine regelungstechnische Struktur eines Zustandsbeobachters . . . . .	59
3.17	Kalman-Filter als optimaler Beobachter . . . . .	60
3.18	Workflow zur Entwicklung der Informationsverarbeitung des Lokalisierungsmoduls	65
3.19	Beispielhafte Lage der Fahrzeugsensoren und Referenzsysteme zur Navigation . .	66
3.20	Verkettung der Koordinatensysteme bei der Bestimmung des Gierwinkels $\psi_F$ und des Nickwinkels $\theta_F$ . . . . .	67
3.21	Informationsfluss im Lokalisierungsmodul . . . . .	69
3.22	Entwicklung des Systemmodells des Erweiterten Kalman-Filters. . . . .	70
3.23	<i>Mensch vor Strauch</i> : Intensitätsbild einer PMD-Kamera . . . . .	79
3.24	<i>Mensch vor Strauch</i> : Distanzbild einer PMD-Kamera . . . . .	79
3.25	<i>Mensch vor Strauch</i> : CCD-Bild der aufgenommenen Szene . . . . .	79
3.26	<i>Fahrzeug</i> : Intensitätsbild einer PMD-Kamera . . . . .	82
3.27	<i>Fahrzeug</i> : Distanzbild einer PMD-Kamera . . . . .	82
3.28	<i>Fahrzeug</i> : CCD-Bild der aufgenommenen Szene . . . . .	82
3.29	<i>Person</i> : Distanzbild einer PMD-Kamera mit deaktivierter Unterdrückung von Mehrdeutigkeitswerten (Softwareoption) . . . . .	83
3.30	<i>Person</i> : Distanzbild einer PMD-Kamera mit aktivierter Unterdrückung von Mehrdeutigkeitswerten (Softwareoption) . . . . .	83
3.31	<i>Person</i> : CCD-Bild der aufgenommenen Szene . . . . .	83
3.32	Mögliche Sensoranordnung einer PMD-Kamera in einem mobilen System zur Vermeidung von Mehrdeutigkeit der Entfernungsinformation . . . . .	83
3.33	Ablaufplan zur Detektion von Hindernissen aus dem 3D-Bild der PMD-Kamera	84
3.34	Algorithmus zur Objektdetektion am Beispiel . . . . .	86
3.35	Ablaufplan zur Detektion von Fahrbahnmarkierungen aus dem Intensitätsbild der PMD-Kamera . . . . .	87
3.36	Algorithmus zur Detektion von Fahrbahnbegrenzungen am Beispiel . . . . .	88
3.37	Messprinzip eines Laserscanners . . . . .	88
3.38	Ablaufplan zur Erkennung von positiven Hindernissen . . . . .	90
3.39	Algorithmus zur Detektion von positiven Hindernissen am Beispiel . . . . .	91

3.40	Verwendete Sensoranordnung zur Umgebungserfassung beim Test- und Entwicklungsfahrzeug „Quanjo TDS“ . . . . .	91
3.41	Mittels Gitterrepräsentation diskretisierter Arbeitsraum und Ergebnis der Distanztransformation . . . . .	94
3.42	Distanztransformation angewendet auf Hindernisse . . . . .	95
3.43	Ablauf der graphenbasierten Planungskomponente des Moduls zur autonomen Wegpunktfahrt . . . . .	96
3.44	Methode der zufälligen Verteilung von Punkten am Beispiel . . . . .	97
3.45	Graph für die optimalbasierte Pfadsuche am Beispiel . . . . .	98
3.46	Struktur der Wegpunktregelung . . . . .	99
3.47	Struktur der Ausweichsteuerung . . . . .	100
3.48	Regelgrößen der Ausweichsteuerung am Beispiel . . . . .	101
3.49	Situationsbereiche zur Manöverauswahl bei der Ausweichsteuerung . . . . .	102
3.50	Manöver beim Umfahren eines einzelnen Hindernisses (Simulation) . . . . .	104
3.51	Struktur der Fahrzeugregelung . . . . .	105
3.52	Verwendetes Modell der Querdynamik von Landfahrzeugen am Beispiel des Fahrzeuges „Quanjo TDS“ . . . . .	106
3.53	Für die Bemessung des Querreglers verwendete Regelungsstruktur zur Führung des Gierwinkels $\gamma^*$ . . . . .	107
3.54	Querregelung eines Führungssprungs des Lenkwinkels von $0^\circ$ auf $45^\circ$ . . . . .	108
3.55	Querregelung eines Führungssprungs des Lenkwinkels von $0^\circ$ auf $45^\circ$ . . . . .	109
3.56	Querregelung eines Führungssprungs des Lenkwinkels von $0^\circ$ auf $45^\circ$ mittels PD-Regler (D) und einer Totzeit von 0.1 s . . . . .	110
3.57	Struktur der Querführung mit Smith-Prädiktor zur Kompensation einer Streckentotzeit . . . . .	111
3.58	Querregelung eines Führungssprungs des Lenkwinkels von $0^\circ$ auf $45^\circ$ mittels PD-Regler (D) bei einer Totzeit von 0.1 s und Erweiterung der Regelung um den Smith-Prädiktor . . . . .	112
3.59	Positionsregelung bei der Anfahrt eines Zielpunktes ( $x_z=50$ m, $y_z=50$ m) mit PD-Regler B und Streckentotzeit . . . . .	113
3.60	Interaktion der Module . . . . .	114
3.61	Struktur des realisierten Moduls „Lokalisierung“ als eingebettetes System . . . . .	115
3.62	Realisierung der Datenverarbeitung auf dem Kern des Mikrocontroller M3-Cortex115	
4.1	Struktur der Simulation der Fahrtführung als Gesamtsystem . . . . .	118
4.2	Prinzipieller Ablauf der Simulation des Moduls zur Umgebungserfassung . . . . .	118
4.3	Hindernisumfahrung (Hindernis „Kasten“) . . . . .	119
4.4	Wegpunktplanung bei der Hindernisumfahrung (Hindernis "komplex“) . . . . .	120
4.5	Test des Gesamtsystems bei der Hindernisumfahrung (Hindernis „komplex“) . . . . .	120
4.6	Hindernisumfahrung (Hindernis „U“) . . . . .	121
4.7	Rechenzeit der Wegpunktplanung in Abhängigkeit von der Anzahl der Hindernisse	121
4.8	Anfahrt eines Zielpunktes ohne Totzeit und Störung bei 15 km/h . . . . .	122
4.9	Anfahrt eines Zielpunktes bei 15 km/h in RTK-Qualität ohne und mit Einsatz des Positionsfilters des Moduls „Lokalisierung“ . . . . .	123

---

4.10	Anfahrt eines Zielpunktes und Umfahren eines Hindernisses bei 7 km/h in RTK-Qualität mit einer Verarbeitungsrate des Moduls „Umgebungserfassung“ von 100 Hz bzw. 10 Hz . . . . .	124
4.11	Anfahrt eines Zielpunktes und Umfahren eines Hindernisses bei 15 km/h in RTK-Qualität mit einer Verarbeitungsrate des Moduls „Umgebungserfassung“ 10 Hz mit Totzeit der Lenkaktorik und ohne Totzeit der Lenkaktorik . . . . .	124
4.12	Vergleich der Position von DGPS und GPS . . . . .	125
4.13	Positionsfehler und Kurswinkel im Vergleich zum Einsatz des Positionsfilters . . . . .	126
4.14	Position des Fahrzeuges „Quanjo TDS“ und Liniensegmente zu Hindernissen der Umgebung während einer Versuchsfahrt . . . . .	127
4.15	Position des Fahrzeuges „Quanjo TDS“ und Liniensegmente zu Hindernissen der Umgebung während einer Versuchsfahrt (Ausschnitt) . . . . .	128
4.16	Anzahl der aus den Strukturen der Umgebung generierten Liniensegmenten während einer Versuchsfahrt . . . . .	129
4.17	Position des Test- und Demonstrationsfahrzeuges „Quanjo TDS“ während einer Versuchsfahrt zum Test des Gesamtsystems der Fahrtführung: Anfahrt eines Zielpunktes und Umfahren eines Hindernisses . . . . .	130
A.1	Rotation um die Z-Achse . . . . .	138
B.1	Abschnitte der Teststrecke (Google Earth®) . . . . .	141
B.2	Fotoaufnahmen der einzelnen Abschnitte der Teststrecke . . . . .	142

# Tabellenverzeichnis

1.1	Zusammenfassung der technischen Daten des Test- und Demonstrationssystems „Quanjo TDS“ . . . . .	14
2.1	Protokoll der Übermittlung der Positionsinformation . . . . .	34
2.2	Protokoll der Übermittlung der detektierten Hindernisse durch das Wahrnehmungsmodul . . . . .	35
2.3	Datenprotokoll der Übermittlung des Fahrkommandos vom Steuerrechner zur Fahrzeugschnittstelle . . . . .	35
2.4	Datenprotokoll zur Missionsübertragung . . . . .	35
2.5	Übersicht der verwendeten Hardwarekomponenten zur Realisierung des prototypischen Fahrtführungssystems . . . . .	37
2.6	Übersicht der verwendeten Verbindungstypen zur Realisierung des prototypischen Fahrtführungssystems . . . . .	37
3.1	Qualitative Eigenschaften von Sensorik zur selbständigen Navigation mobiler Systeme . . . . .	42
3.2	Ausgewählte Felder der NMEA-Nachricht „GPRMC“ . . . . .	48
3.3	Ausgewählte Felder der NMEA-Nachricht „GPGGA“ . . . . .	48
3.4	Auswertung des HDOP-Signals zur Ermittlung der erzielbaren horizontalen Genauigkeit . . . . .	49
3.5	Zur Ausweichsteuerung verwendete Größen . . . . .	101