

Lehrstuhl für Kommunikationsnetze
Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld

Kontextsensitive Vernetzungsstrategien für avionische Sensorsysteme

**Genehmigte Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dortmund**

**von
Dipl.-Ing. Kai Daniel**

Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Andreas Timm-Giel
Dissertation eingereicht am:	23. Dezember 2011
Tag der mündlichen Prüfung:	17. April 2012

Dortmunder Beiträge zu Kommunikationsnetzen und -systemen

Band 5

Kai Daniel

**Kontextsensitive Vernetzungsstrategien
für avionische Sensorsysteme**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

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.: Dortmund, Technische 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 978-3-8440-1193-7

ISSN 1867-4879

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

Mit großem Stolz habe ich die Verleihung der Doktorwürde nach Abschluss meiner Arbeit erlebt. Nichtsdestotrotz habe ich bei all der Freude nicht aus den Augen verloren, dass mir diese Ehre nicht zuteil hätte werden können, wenn mich nicht eine Vielzahl von Menschen auf meinem Weg begleitet und unterstützt hätte. Daher möchte ich die Gelegenheit nutzen, um meinen tiefen Dank zum Ausdruck zu bringen.

Diese Arbeit ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der TU Dortmund entstanden. Mein besonderer Dank für die hilfreiche Unterstützung bei der Erstellung meiner Doktorarbeit gilt vor allem meinem Doktorvater Professor Dr.-Ing. Christian Wietfeld, der mit stetiger Diskussionsbereitschaft, konstruktiver Kritik und vielen Ideen wertvolle Impulse zum Gelingen der Arbeit gegeben hat. Ich danke ihm weiterhin sehr herzlich für die eingeräumte Freiheit, einen systemorientierten und interdisziplinären Ansatz umzusetzen zu können sowie für die Möglichkeit zur Teilnahme an zahlreichen internationalen Konferenzen.

Für die fachlichen Hinweise in der Endphase meiner Promotion sowie für die Übernahme und zügige Erstellung des Zweitgutachtens bin ich Professor Dr.-Ing. Andreas Timm-Giel vom Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der TU Hamburg-Harburg dankbar. Ebenso herzlich bedanke ich mich bei den weiteren Mitgliedern der Prüfungskommission, Professor Dr.-Ing. Christian Rehtanz und Dr.-Ing. Frank Hoffmann.

Dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) danke ich für die Finanzierung des Projektes AirShield, in dessen Rahmen diese Arbeit entstanden ist. Für die gute Zusammenarbeit im AirShield-Projekt danke ich ebenso allen Projektpartnern.

Nicht versäumen will ich, den Kollegen, Mitarbeitern und Studierenden meiner Forschungsgruppe zu danken, die mir insbesondere in der Endphase meiner Arbeit viele Aufgaben abnahmen. Vom ersten Tage an haben sie den Institutsalltag in einer belebenden Art und Weise geprägt und zu einem angenehmen Arbeitsumfeld beigetragen, so dass ich meine Tätigkeiten stets mit viel Überzeugung und Freude ausführen konnte.

Ganz besonders danke ich meinen Kollegen, die ich heute auch zu meinen Freunden zählen darf. Die Zusammenarbeit mit ihnen war ein Meilenstein bei der Erstellung meiner Doktorarbeit und vor allem die vielen gemeinsamen Nachtschichten vor Konferenzen werden mir in stets guter Erinnerung bleiben. Daher danke ich ganz ausdrücklich Sebastian Rohde, Niklas Goddemeier und Daniel Behnke für die vielen kontroversen Diskussionen, zahlreichen Ideen, akribischen Reviews und die fortwährende Unterstützung. Meinem Freund und langjährigem Wegbegleiter meines akademischen Werdegangs, Dr.-Ing. Karlheinz Ochs, danke ich ganz herzlich für die mathematisch-analytischen Tipps und die persönliche Unterstützung in den letzten Tagen dieser Arbeit.

Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Eltern bedanken, ohne die ein Studium und eine Doktorarbeit niemals möglich geworden wäre und die in jeglicher Hinsicht die Grundsteine für meinen Weg gelegt haben. Ein besonderer Dank gilt auch meinem Bruder Mirco, der immer an mich geglaubt und mir Mut zugesprochen hat, wenn dies von Nöten war.

Nicht zuletzt gebührt mein Dank meiner Lebensgefährtin Tina, die mich während dieser schwierigen Zeit großartig unterstützt hat. Für ihre Entbehrungen, ihren bedingungslosen Rückhalt und das mir entgegengebrachte, nicht zu übertreffende Maß an Verständnis danke ich ihr von ganzem Herzen.

Kurzfassung

Vor dem Hintergrund unkontrollierter Schadstoffemissionen durch Großbrände oder Industrieunfälle stellt die zielgerichtete, zuverlässige und schnelle Aufklärung potenziell kontaminierter Umgebungen einen wesentlichen Erfolgsfaktor zur Eingrenzung und Bekämpfung von Gefahrenlagen dar. Derzeit sind Messungen durch ABC-Einheiten der Feuerwehren auf die unmittelbare Bodennähe beschränkt und liefern unzureichende Informationen über Art und Ausmaß von Kontaminationen. Der Einsatz eines neuartigen Systems, in dem Flugroboter, so genannte *Micro Unmanned Aerial Vehicles (MUAVs)*, in einem Schwarm agieren, schafft demgegenüber einen erheblichen Mehrwert bei der Erkundung und Aufklärung kontaminierter Umgebungen.

In der vorliegenden Arbeit werden der Systementwurf und verschiedene Methoden zur kontextsensitiven Vernetzung für entsprechende avionische Sensorsysteme vorgestellt. In bisherigen Forschungsarbeiten stehen die Steuerung einzelner UAVs, vermaschte Sensornetze am Boden sowie die zentralistische oder deterministische Erkundung von Gebieten im Vordergrund. Demgegenüber wird in dieser Arbeit ein autonomes Verhalten des MUAV-Schwarms angestrebt, so dass ein effizienter und stabiler Einsatz auch in einer komplexen und zeitvarianten Systemumgebung möglich wird. Hierzu wurde zunächst eine Systemarchitektur entwickelt, die es ermöglicht mit Hilfe eines agentenbasierten Ansatzes die erforderliche Autonomie zu erzielen.

Darauf aufbauend besteht ein wesentlicher Beitrag dieser Arbeit im Entwurf kommunikationssensitiver Mobilitätsalgorithmen, die in der Lage sind die Kohärenz eines MUAV-Netzes aufrecht zu erhalten und im Extremfall eines vollständigen Verbindungsabbruches die Kohärenz durch geeignete kontrollierte Mobilität wiederherzustellen. Hierzu werden deterministische wie auch zufallsbasierte Mobilitätsalgorithmen entwickelt und untersucht, die ein Gleichgewicht zwischen optimaler Netztopologie und Konnektivität auf Basis von Kanalmessungen und -schätzungen herstellen. Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit werden die neu entwickelten Algorithmen *Cluster Breathing*, *Cooperative Repelling Walk* und *Smart Cube* mit makroskopischen Erkundungsstrategien kombiniert. Dazu werden die Interdependenzen zwischen Mikro- und Makromobilität im Hinblick auf Explorationseffizienz und Kommunikationsgüte für unterschiedliche Ausbreitungskanäle analysiert und bewertet. In diesem Zusammenhang wurde ein neuartiges Kanalmodell für MUAV-Übertragungskanäle abgeleitet. Die Leistungsbewertung mit einer detaillierten Systemsimulation zeigt, dass der Einsatz der vorgestellten kommunikationssensitiven Mobilitätsstrategien sowohl im Hinblick auf eine durchgängige Vernetzung als auch im Hinblick auf die Erkundungseffizienz sehr gute Ergebnisse erzielt und aufgrund seiner Flexibilität und Robustheit rein-deterministischen Verfahren deutlich überlegen ist.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind primär im Rahmen des BMBF-Verbundprojekts *AirShield* entstanden und bilden darüber hinaus die Grundlage für weiterführende Arbeiten, z.B. im Hightech.NRW-Projekt *AVIGLE* und in weiteren nationalen und europäischen Forschungsprojekten. Die Ergebnisse dieser Arbeit haben in der Fachwelt große Aufmerksamkeit erregt, was durch eine Vielzahl internationaler Veröffentlichungen belegt ist.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	v
Inhaltsverzeichnis	v
Bildverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	xi
Abkürzungsverzeichnis	xii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Anwendungsgebiet	1
1.2 Lösungsansatz für eine übergreifende MUAV-Systemarchitektur	3
1.2.1 Drone to Ground Station Links (DGSL)	5
1.2.2 Inter Drone Links (IDL)	7
1.2.3 Anwenderzentrische Vernetzung der Systemkomponenten	7
1.2.4 Restriktionen und Randbedingungen des Systemmodells	10
1.3 Ziele und Hauptfragestellungen	10
1.3.1 Optimierung des Kommunikations- und Bewegungsverhaltens	11
1.3.2 Übergreifende Basisfragestellungen des Systementwurfs	14
1.4 Einordnung und Abgrenzung des Themas	16
2 Bewertung existierender Basistechnologien und Forschungsansätze	19
2.1 Formulierung der Anforderungen für den Systementwurf	19
2.2 Grundlagen	20
2.2.1 Kommunikationsnetze und -systeme	20
2.2.2 Agent und Schwarm	21
2.2.3 Mobilitätsmodelle in der Netzplanung	25
2.2.4 Unmanned Aerial Vehicle (UAV)	28
2.3 Auswahl geeigneter Zugriffstechnologien und Vernetzungsstrategien	29
2.3.1 Leistungsparameter ausgewählter Mobilfunknetze	30
2.3.2 Zellularfunknetze als DGSL-Basistechnologie	32
2.3.3 Ad-hoc Vernetzungskonzepte als IDL-Basistechnologie	35
2.3.4 Eignung ziviler Luftfahrt- und Satellitenkommunikationssysteme	40
2.4 Planungsmethoden und kognitive Strategien zur Sensorpositionierung	42
2.4.1 Klassischer Entwurfsprozess in der Netzplanung	42
2.4.2 Selbstorganisierende Topologieplanung für avionische Sensornetze	43
2.4.3 Voronoi- und Lloyd-basierte Gruppenmobilität	46

2.5	UAV-basierte Kommunikationssysteme und artverwandte Forschung . . .	52
2.5.1	Chemotaxis, Anemotaxis und Fluxotaxis	52
2.5.2	Autonome Sensornetze für die avionische Fernerkundung	54
2.5.3	Avionische Service-Bereitstellung und Netzplanung	55
2.6	Übergreifende Bewertung existierender Lösungsansätze	57
3	Systementwurf des avionischen Sensornetzes	61
3.1	Netzarchitektur und Verteilung der physikalischen Instanzen	61
3.1.1	Avionische Subsysteme	61
3.1.2	Bodengebundene Subsysteme	62
3.2	Dienstarchitektur, Schnittstellen und Funktionen	63
3.3	Protokollentwurf zur logischen Vernetzung der Subsysteme	66
3.3.1	Luftkommunikation: DGSL und IDL Protokoll	66
3.3.2	Bodenkommunikation	70
3.3.3	Vernetzung und Adressierung der Luft- und Bodeneinheiten . .	71
3.4	Agentenentwurf zur funkfeldsensitiven Mobilitätsplanung	73
4	Konzeption und Evaluation kommunikationssensitiver Mobilitätsalgorithmen	77
4.1	Anforderungen und Leistungsindikatoren der kanaladaptiven Mobilität	77
4.2	Grundkonzept kommunikationssensitiver Mobilitätsalgorithmen	79
4.3	Annahmen, Randbedingungen und Modellierung der Einsatzumgebung	82
4.4	Kommunikationssensitive Mobilitätsstrategien auf Mikroebene	84
4.4.1	Cluster Breathing (CB)	84
4.4.2	Cluster Fusion (CF)	88
4.4.3	Cooperative Repelling Walk (CoopRW)	90
4.4.4	Smart Cube (SC)	92
4.4.5	Neighbor Repellence (NR) zur Kollisionsvermeidung	96
4.5	Makroskopische Gruppenmobilitätsalgorithmen	97
4.5.1	Referenz: Deterministische Tourenplanung (DTP)	98
4.5.2	Referenz: Self Repelling Walk (SRW)	99
4.5.3	Cluster Repelling Walk (CIRW)	101
5	Experimentelle Validierung und Kanalcharakterisierung	103
5.1	Prototypenentwurf und -validierung	103
5.2	Untersuchung der Stabilität und IDL-Immunität gegen Eigeninterferenzen	106
5.2.1	Messaufbau und Vorgehensweise für die Interferenzanalyse . . .	107
5.2.2	Interferenz- und Skalierbarkeitsanalyse für die IDL	108
5.3	Evaluierung von Latenzzeiten in Zellularfunknetzen	114
5.4	Charakterisierung des Funkkanals für Low Altitude Platforms	117
5.4.1	Funkausbreitungseigenschaften der Inter Drone Links	117
5.4.2	Funkausbreitungseigenschaften der Drone to Ground Station Links	119
5.4.3	Entwurf eines Höhen- und Distanzabhängigen Kanalmodells . .	121
6	Analyse der selbstkonfigurierenden Teamstrategien zur UAV-Vernetzung	127
6.1	Methoden zur Modellierung und Analyse	127
6.1.1	Multiskalare Simulationsarchitektur	127
6.1.2	Einfluss der kinematischen Eigenschaften	129
6.2	Analyse der mikroskopischen Effizienz: Netztopologie und Kohärenz . .	130
6.2.1	Kooperative Wahrnehmung im UAV-Cluster	131
6.2.2	Cluster Breathing (CB)	132
6.2.3	Cooperative Repelling Walk (CoopRW)	145

6.2.4	Smart Cube (SC)	150
6.3	Vergleich und Diskussion der entwickelten Verfahren	155
7	Leistungsbewertung der kommunikationssensitiven Erkundungsstrategien	159
7.1	Szenario und Versuchsbeschreibung	159
7.2	Analyse der räumlichen Erkundung (SER)	160
7.2.1	Einfluss der Kanalqualität auf die Erkundung	161
7.2.2	Einfluss der Mesh-Größe auf die Erkundung	162
7.3	Verteilungs- und Redundanzanalyse der Netzplanung	165
7.4	Validierung des Simulationsmodells durch Markov-Ketten	169
7.4.1	Modellierung von Zustandsraum und Übergangdiagramm	169
7.4.2	Stochastische Berechnung der räumlichen Explorationseffizienz	171
7.4.3	Analyse und Validierung der dreidimensionalen Erkundung	173
8	Zusammenfassung und Ausblick	177
	Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis	181

Bildverzeichnis

1.1	Referenzszenario: Tropospherische Ausbreitung einer Schadwolke	1
1.2	Referenzanwendungsgebiet und Lösungsansatz	4
1.3	Kritische Abhängigkeit zwischen Geschwindigkeit und Delay	6
1.4	Aufbauorganisation bei einem ABC-Feuerwehreinsatz	8
1.5	Vereinfachte Ablauforganisation: UAV-gestützter Feuerwehreinsatz . . .	9
1.6	Mögliche avionische Netztopologien und System-Leistungsgrenzen . . .	13
1.7	Thematische Einordnung, Anforderungen und Ziele	17
2.1	Anforderungen an das MUAV-basierte Fernerkundungssystem	19
2.2	Kommunikationssystem, Subsysteme und Schnittstellen	21
2.3	Gruppeninteraktive Mobilitätsmodelle nach REYNOLDS	24
2.4	Umgebungszentrische Mobilitätsmodelle nach REYNOLDS	25
2.5	Zufallsbasierte Mobilitätsmodelle	28
2.6	Micro-UAV: Microdrones MD4-200	28
2.7	Klassifikation von Mobilfunknetzen für operationelle MUAV-Einsätze .	30
2.8	Anforderungen der IDL und DGSL an Mobilität und Datenrate	32
2.9	Verkürzung und Einfluss der Latenzzeiten mit HSDPA	33
2.10	Frequenzbelegung der zivilen Luftfahrtkommunikation	40
2.11	Netzplanungsprozess im Überblick	43
2.12	Struktur und Algorithmen selbstorganisierender Sensornetze	45
2.13	Voronoi Konstruktion	47
2.14	Trajektorie auf Basis von Potentialfeldern	49
2.15	Prinzip des Ameisenalgorithmus	51
2.16	Divergente Anforderungen der UAV-basierten Fernerkundung	53
2.17	Luftgestützte Bereitstellung von Kommunikationsdiensten	56
3.1	Netz- und Verteilungsarchitektur des Gesamtsystems	61
3.2	Dienstarchitektur und Schnittstellen des Gesamtsystems	64
3.3	Logische Verbindungen und Datenfluss zwischen der avionischen Instanzen	66
3.4	<i>Binary Message</i> Format der Inter Drone Links	67
3.5	Handover zwischen HSPA bzw. Mobile WiMAX und WLAN	73
3.6	Graph und Laplace-Matrix eines Netzes	74
3.7	Entwurf eines Agenten für die kommunikationssensitive Fernerkundung	75
4.1	Gleichgewichtsproblematik für Konnektivität und Erkundungseffizienz .	77
4.2	Regelkreis für kommunikationssensitive Mobilität	79
4.3	Überblick kommunikationssensitiver Mobilitätsalgorithmen	80
4.4	Überlagerung und Gewichtung unterschiedlicher Algorithmen	81

4.5	Clusteratmung auf Basis eines polyedrischen Schwerpunktes	85
4.6	Clusteratmung mit 4-Punkt Hysterese	87
4.7	Trajektorien mit Separationen und mehreren Clustern	89
4.8	Zusammenwirken von <i>Cluster Fusion</i> und <i>Cluster Breathing</i>	89
4.9	Funktionsweise des <i>Cooperative Repelling Walk</i> - Algorithmus	91
4.10	Gegenüberstellung der Sensorverteilung für <i>CB</i> und <i>SC</i>	93
4.11	Smart Cube mit Lloyd (k-Means) Algorithmus	94
4.12	Ausgewählte Referenzen für die makroskopische Exploration	97
4.13	Statische Erkundungsformation bei 80 km/h mit 5 MUAV	99
4.14	<i>Self Repelling Walk</i> bei 80 km/h mit 5 MUAV	100
5.1	Prototypischer Entwurf und Tests der integrierten Flugplattform	103
5.2	<i>Gumstix</i> -Embedded PC als Plattform des Kommunikationssubsystems	104
5.3	Elemente der lokalen Routenplanung sowie Hindernisvermeidung	105
5.4	Vorrichtungen zur MUAV-basierten Gas-Messung	105
5.5	Spektrale Interferenzansicht bei 2.4 GHz in realer Umgebung	106
5.6	Messaufbau zur Bestimmung der IDL-Zuverlässigkeit	107
5.7	WLAN-Spektrum für einen Störer auf Kanal 3 und EUT auf Kanal 6	108
5.8	Auswirkungen von Gleichkanalstörern auf die <i>Round Trip Times (RTT)</i>	109
5.9	Einfluss von Störungen im 2.4 GHz Frequenzband (EUT auf CH11)	110
5.10	Einfluss von Gleichkanalstörungen auf die RTT der IDL bei 5.2 GHz	112
5.11	Ende-zu-Ende Jitter für 5.2 GHz	113
5.12	Durchsatz und Paketfehlerrate für 5,2 GHz	113
5.13	Setup für RTT Messungen über <i>Internet Control Message Protocol (ICMP)</i>	115
5.14	<i>RTT</i> Messungen im Vergleich	116
5.15	Dominanz der Zweivegeausbreitung bei IDL	118
5.16	Besonderheiten der DGSL-Funkversorgung	119
5.17	Einfluss des Antennengewinns und von Reflektionen	121
5.18	Einfluss der Höhe auf die UAV-Empfangsleistung	122
5.19	Vergleich unterschiedlicher Kanalmodelle	123
6.1	Architektur der Multiskalen-Simulation	128
6.2	Einfluss der kinematischen UAV-Eigenschaften	129
6.3	Numerische CCPR-Bestimmung durch Monte Carlo Simulation	131
6.4	Referenzen und Szenarien zur Analyse des mikroskopischen Verhaltens	133
6.5	CCPR bei 4 dB- <i>Lognormal-Fading</i>	134
6.6	Durchsatz bei 4 dB- <i>Lognormal-Fading</i>	134
6.7	PER-Verhalten bei <i>Large-Scale-Fading</i>	135
6.8	Mittlere Verzögerungszeiten bei <i>Large-Scale-Fading</i>	135
6.9	Trajektorien und Netztopologien für dynamische Hysterese	136
6.10	Einfluss von Kanal und Clustergröße auf das CB/CF-Verhalten	137
6.11	CB/CF-Trajektorien ohne Makro-Bewegung	138
6.12	Einfluss des reflektierten Pfades auf den <i>Clusterbreathing</i> -Algorithmus	139
6.13	Vergleich der Robustheit unterschiedlicher <i>CB</i> -Verfahren	140
6.14	Wirkungsweise des kommunikationssensitiven <i>Cluster Breathing</i>	142
6.15	Explorationsgewinn durch Oszillation des CB-Algorithmus	143
6.16	Topologie-Eigenschaften für <i>CB</i> bei 4 dB-Lognormal Fading	144
6.17	Statistische Verteilung der auftretenden Konnektivitäten für <i>CB</i>	145
6.18	Einfluss von Kanal und Clustergröße auf <i>CoopRW</i>	146
6.19	<i>CoopRW</i> -Trajektorien bei quasi-Stationarität für <i>n</i> -Agenten	147
6.20	Topologie-Eigenschaften für <i>CoopRW</i>	149

6.21	Einfluss von Kanal und Clustergröße auf <i>SCDyn</i>	151
6.22	Analyse der <i>Smart Cube</i> Systemeigenschaften	152
6.23	Topologie-Eigenschaften für SC bei 4 dB-Lognormal Fading	153
7.1	Explorationseffizienz (SER) für unterschiedliche Mobilitätsalgorithmen	160
7.2	Einfluss der Kanalqualität auf die Erkundungseffektivität	161
7.3	Zusammenhang zwischen UAV-Anzahl und Abdeckung	163
7.4	Abdeckung für unterschiedliche Knoten-Anzahl	164
7.5	CDI-Vergleich für unterschiedliche Verfahren und 5 Knoten	167
7.6	Analyse der Redundanz bei der Exploration	168
7.7	Übergangswahrscheinlichkeiten und Zerlegung des Zustandsraums S	170
7.8	$\mathcal{E}(\mathcal{C})$ -Vergleich mit Ergebnissen aus [YCBE10]	173
7.9	Analytische Berechnung der 3D-Erkundung mit Markov-Modell	174
7.10	Vergleich und Bewertung der simulativen sowie analytischen Ergebnisse	175

Tabellenverzeichnis

1.1	Beteiligte Einheiten der Feuerwehr bei einem ABC-Rettungseinsatz . . .	8
2.1	Kategorien von UAV-Systemen [Blye09]	29
2.2	Ausgewählte Eigenschaften der WLAN Standards	36
2.3	Bewertungsübersicht existierender Forschungsansätze	59
3.1	Protokoll für die Übertragung von Flugbahndaten	68
4.1	MUAV Systemparameter und Eigenschaften der Einsatzumgebung . . .	84
5.1	Ausgewählte Systemeigenschaften für IEEE 802.11a/h	111
5.2	Vergleich von <i>Large-Scale</i> Kanalmodellen	120
5.3	Höhenabhängige Parametrisierung des HD ² -DGSL-Kanalmodells	126
6.1	Vergleich kommunikationssensitiver Mobilitätsalgorithmen	155