

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

# **Entwurf und Leistungsbewertung von Ad-hoc-Kommunikationsnetzen für den Katastrophenschutz**

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

von  
Dipl.-Ing. Andreas Herbert Wolff  
aus  
Düsseldorf

Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kays
Dissertation eingereicht am:	25.06.2013
Tag der mündlichen Prüfung:	23.09.2013



Dortmunder Beiträge zu Kommunikationsnetzen und -systemen

Band 7

**Andreas Herbert Wolff**

**Entwurf und Leistungsbewertung von Ad-hoc-  
Kommunikationsnetzen für den Katastrophenschutz**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag  
Aachen 2013

**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., 2013

Copyright Shaker Verlag 2013

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2295-7

ISSN 1867-4879

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

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

*Für meine Kinder  
Leon und Maximilian*



## Danksagung

Diese Doktorarbeit ist während meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der TU Dortmund entstanden. Mein aufrichtiger Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld, für seine Motivation, inspirierende Ratschläge und hilfreiche Unterstützung.

Für die Übernahme des Korreferats und die intensive Auseinandersetzung mit meiner Doktorarbeit danke ich Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kays. Darüber hinaus bedanke ich mich bei den weiteren Mitgliedern der Prüfungskommission Herrn Prof. Dr.-Ing. Stephan Frei und Herrn Prof. Dr.-Ing. Christian Rehtanz.

Außerdem danke ich dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Finanzierung dieser Arbeit im Rahmen des Forschungsprojektes SPIDER. In diesem Zusammenhang möchte ich meinen Dank allen Projektpartnern für die erfolgreiche Zusammenarbeit zum Ausdruck bringen. Insbesondere bedanke ich mich bei Brandrat Ansgar Stening von der Feuerwehr Gelsenkirchen für die inspirierende Zusammenarbeit.

Besonderer Dank geht an Mohamad Sbeiti und Sebastian Subik für wertvolle und anregende Diskussionen. Herzlichen Dank an alle Studenten und wissenschaftlichen Hilfskräfte, die zu meiner Forschung während ihrer Zeit am CNI beigetragen haben.

Für das inhaltliche Lektorat bedanke ich mich bei Mohamad Sbeiti, Markus Putzke, Christoph Ide und Carsten Rietfort. Ferner bedanke ich mich bei meinem Vater Dr. Gunter E. Wolff für die Korrektur der Arbeit.

Außerdem geht mein besonderer Dank an meine Familie, für ihre emotionale Unterstützung und den Rückhalt, den ich in schweren Situationen gebraucht habe.

Schließlich danke ich meiner wundervollen Frau Christina für ihre Liebe, ihre tatkräftige Unterstützung und unerschöpfliche Geduld.

*Andreas Herbert Wolff*

*Essen, September 2013*



## Kurzfassung

Ein zuverlässiges Kommunikationsnetz stellt die wesentliche Basis für zukünftige, IT-gestützte Dienste für Rettungskräfte an einem Schadensort dar. Heutzutage basiert die Kommunikation im Katastrophenschutz auf dem digitalen Behördenfunk TETRA, bzw. in Teilen noch auf dem analogen BOS-Funk. Diese bieten keine ausreichende Datenrate für Multimedia-Anwendungen. Existierende Infrastrukturnetze, wie z.B. das öffentliche Mobilfunknetz, können bei einer Großschadenslage überlastet sein oder beschädigt werden und sind daher für Rettungskräfte nicht uneingeschränkt nutzbar. Um neue Multimedia Dienste am Schadensort zuverlässig nutzen zu können, sind Rettungskräfte daher auf ihr eigenes lokales Kommunikationsnetz angewiesen. Für die Rettungskräfte ist ein praktischer Netzaufbau essentiell, wobei die Technik den Einsatzablauf nicht behindern darf. Zudem bestehen Anforderungen an die Dienstgüte des Netzes und die Leistungsfähigkeit in Bezug auf die Datenrate, da z.B. Videos von Helmkameras übertragen werden sollen.

Ziel dieser Arbeit ist der Entwurf und die Leistungsbewertung von praxistauglichen Kommunikationslösungen für Ad-hoc-Netze im Katastrophenschutz. Zur Realisierung eines benutzerfreundlichen Netzaufbaus wird ein praxistaugliches Vernetzungskonzept vorgestellt, welches einen selbstkonfigurierenden Ad-hoc-Aufbau erlaubt. In enger Zusammenarbeit mit der Feuerwehr werden rettungsprozesskonforme Netz-Aufbaustrategien erforscht, welche die Rettungskräfte bei ihrer Arbeit nicht einschränken und als Basis für eine zuverlässige Kommunikation genutzt werden können.

Die wesentliche Basistechnologie des Lösungsansatzes ist 802.11-basierte Kommunikation, welche im 5 GHz Band betrieben wird. WLAN Stationen eines Netzes können sich gegenseitig stören oder durch andere Netze gestört werden. In dieser Arbeit wird daher ein neuartiges Verfahren zur Verringerung der Interferenz vorgestellt. Der im Rahmen der Arbeit entwickelte *Interference Avoidance Algorithm* (IAA) deaktiviert redundante Router im Netz der Rettungskräfte. Mittels Simulation wurde gezeigt, dass in den untersuchten Szenarien im Durchschnitt eine höhere *packet delivery ratio* im Vergleich zur Vernetzung ohne IAA erreicht wird.

Um Störungen, die durch andere Netze verursacht werden, zu verringern, wird im Rahmen der Arbeit eine Priorisierung der Kommunikation der Rettungskräfte durch die Einführung von neuen Kommunikationsklassen vorgeschlagen. Dieses Konzept basiert auf der Modifikation der Parameter der verteilten Medienzugriffsfunktion (DCF) von WLAN, ähnlich dem IEEE 802.11e jedoch noch höher priorisiert, und wird *Emergency-DCF* genannt. Für deren Leistungsbewertung wurde ein existierendes analytisches Markov-Modell modifiziert und erweitert. Anschließend werden die analytischen Ergebnisse simulativ validiert. Die Machbarkeit des Verfahrens wird weiterhin im Experiment validiert.

Die in der Arbeit vorgestellten Forschungsergebnisse sind in Verbundprojekte eingeflossen, in denen neben Industriepartnern auch Anwender aktiv beteiligt waren. So konnte das entwickelte Vernetzungskonzept im Projekt MobileEmerGIS zusammen mit der Feuerwehr Dortmund erprobt werden. Darüber hinaus ist die prozesskonforme Vernetzung im BMBF Projekt SPIDER durch die Feuerwehr Gelsenkirchen in Feldtests validiert worden. Das Vernetzungskonzept wurde in einer modifizierten Version ebenfalls für die Vernetzung der Flugroboter im BMBF Projekt *Airshield* eingesetzt.

Durch mehrere Veröffentlichungen auf Konferenzen und Präsentationen auf Workshops konnte eine internationale Resonanz erzielt werden. Die im Rahmen der Arbeit entwickelten Verfahren werden aktuell in Kooperation mit dem DRK in Bayern im Einsatz erprobt.



## Abstract

A reliable communications network provides the essential basis for future IT-based services for rescue personnel at an incident scene. Nowadays, the communication in civil protection is based on the digital trunked radio TETRA system, or is still based on analog BOS radio system. These systems do not provide sufficient data rate for multimedia applications. Existing infrastructure networks, such as the public mobile telephony network, can be damaged in a major incident situation and therefore are not fully usable for rescue personnel. To use new multimedia services at the incident scene, rescue personnel therefore dependent on their own local communications network. For the rescue personnel a practicable network deployment is essential, whereas the technology should not hinder the rescue process. Moreover, there are demands on the quality of service of the network, and the performance in terms of the data rate, as for example videos should be transferred from helmet cameras.

The aim of this thesis is the design and performance evaluation of a robust communications solution for ad hoc networks in disaster management. To enable a user-friendly network deployment, a reliable networking approach is presented which allows a self-configuring ad hoc deployment. Working closely with the fire department, rescue process-compliant network deployment strategies are investigated which can be used as a basis for reliable communication.

The key enabling technology of the approach is Wi-Fi communication, which operates in 5GHz band. WLAN stations of one network can interfere with each other or can be interfered by other networks on the same channel. In this work, a method for reducing the interference is introduced. The proposed Interference Avoidance Algorithm (IAA) disables redundant router in the network of rescue personnel. It can be shown by simulations that on average in the investigated scenarios a higher packet delivery ratio can be achieved when IAA is active compared to networks without IAA.

In order to reduce interference caused by other networks, a prioritization of the communication of the rescue personnel with the introduction of new communication classes is proposed. This concept is based on the modification of the parameters of the medium access function (DCF) of wireless LAN, which is comparable with IEEE 802.11e but is more prioritized, and is called Emergency-DCF. For its performance evaluation, an existing Markov model is modified and extended. Then, the analytical results are validated by simulation. The feasibility of the method can be validated experimentally.

The presented solutions of this thesis have been developed within and were contributed to research projects, where partners from the industry and end-users were actively involved. Thus, the network concept developed within this thesis was tested together with the Dortmund fire brigades during the project MobileEmerGIS. Moreover, the process oriented networking was validated during field tests by Gelsenkirchen fire brigade during the BMBF project SPIDER. The networking concept was also used in a modified version for networking the flying robots in the BMBF project Airshield.

With several publications in conferences and presentations at workshops, an international resonance has been achieved. Currently, the results of this thesis are being deployed with the German Red Cross in Bavaria.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xv</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xix</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>xxii</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>xxiv</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Ad-hoc-Netze für den Katastrophenschutz . . . . .	3
1.2 Vernetzungskonzept für Rettungskräfte . . . . .	5
1.3 Anwendergerechter Netzaufbau . . . . .	7
1.4 Eingesetzte Methoden . . . . .	9
1.5 Zusammenfassung der Beiträge der Arbeit . . . . .	10
1.6 Gliederung der Arbeit . . . . .	11
<b>2 Ad-hoc-Netze</b>	<b>13</b>
2.1 Kommunikationsnetze . . . . .	13
2.1.1 Historischer Abriss des Behördenfunks . . . . .	14
2.1.2 Wireless LAN . . . . .	16
2.1.3 Routingprotokolle für Ad-hoc-Netze . . . . .	17
2.1.4 Existierende Vernetzungskonzepte . . . . .	22
2.2 Dienstgüte für Multimedia Anwendungen . . . . .	23
2.2.1 Medienzugriffskontrolle . . . . .	23
2.2.2 Enhanced Distributed Channel Access (EDCA) . . . . .	24
2.2.3 Arbitration Interframe Space (AIFS) . . . . .	24
2.2.4 Größe des Wettbewerbsfensters . . . . .	25
2.3 Methoden der Leistungsbewertung . . . . .	27
2.3.1 Multiskalen-Simulation . . . . .	27
2.3.2 Analytische Modellierung mit Markov-Ketten . . . . .	29
2.3.3 Experimentelle Untersuchungen . . . . .	31

<b>3</b>	<b>Prozess-orientierte Ad-hoc-Vernetzung</b>	<b>33</b>
3.1	Szenarienspezifische Dienste . . . . .	33
3.1.1	Digitale Lagekarte . . . . .	34
3.1.2	Videoübertragung von Helmkameras . . . . .	35
3.2	Neuartige Hardware-Plattform - Dropped Units . . . . .	36
3.2.1	Dropped Unit Prototyp - WLAN-Repeater . . . . .	36
3.2.2	Eingebettetes System für flexible Vernetzung . . . . .	37
3.2.3	Ultra-mobile Version der Dropped Units . . . . .	38
3.2.4	Vertrauliche Kommunikation . . . . .	39
3.3	Einfluss der Antennenhöhe auf die Kommunikation . . . . .	40
3.3.1	Analytische Untersuchung des Einflusses der Antennenhöhe . . . . .	40
3.3.2	Versuchsaufbau zum Einfluss auf die Datenrate . . . . .	41
3.3.3	Ergebnisse der Untersuchung . . . . .	42
3.3.4	Konsequenz der Untersuchung . . . . .	43
3.4	Abdeckungsanalyse des Konzepts mittels Simulation . . . . .	43
3.5	Audiovisuell unterstützte Platzierung - AVUP . . . . .	48
3.6	Prozessorientiertes Platzieren von Routern . . . . .	50
3.6.1	Inter-Coupling Unit . . . . .	52
3.6.2	Abdeckungsanalyse des Interkupplungskonzepts . . . . .	53
3.7	Zusammenfassung . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Algorithmen zur Interferenzreduktion</b>	<b>57</b>
4.1	Existierende Knoten-Platzierungs-Algorithmen . . . . .	57
4.1.1	Topology Stitch Algorithmus (TSA) . . . . .	58
4.1.2	Topology Iterative Algorithmus (TIA) . . . . .	59
4.2	Interferenzreduktion bei prozessbedingten Topologien . . . . .	61
4.3	Leistungsbewertung . . . . .	64
4.3.1	Szenarienbeschreibung und Methode . . . . .	64
4.3.2	Anzahl benötigter Knoten . . . . .	66
4.3.3	Vergleich zu existierenden Platzierungsverfahren . . . . .	67
4.4	Zusammenfassung . . . . .	70
<b>5</b>	<b>Dienstgüte für den Katastrophenschutz</b>	<b>71</b>
5.1	Einleitung . . . . .	71
5.2	Mögliche Priorisierung für Rettungskräfte . . . . .	72
5.2.1	Betrieb im dedizierten Spektrum . . . . .	73
5.2.2	Priorisierung durch dedizierte AIFSN . . . . .	73
5.2.3	Neue Zugriffskategorien auf Basis von IEEE 802.11e . . . . .	73
5.3	Neuartige Priorisierungskategorien . . . . .	74
5.4	Optimierung der EDCF Parameter . . . . .	74
5.4.1	Anpassung der SIFS Werte . . . . .	74
5.4.2	Anpassung der Wettbewerbsfenster . . . . .	75
5.5	Analytisches Modell der EDCF . . . . .	77
5.5.1	Herleitung des analytischen Modells für die EDCF . . . . .	77

5.5.2	Zeitdiskrete, zweidimensionale Markov-Modelle . . . . .	79
5.5.3	Markov-Kette für $AC_A$ . . . . .	81
5.5.4	Markov-Kette für $AC_B$ , wenn $DIFS_A < DIFS_B$ . . . . .	85
5.5.5	Berechnung der unbekanntenen Zustandsübergänge . . . . .	88
5.5.6	Berechnung des Sättigungs-Durchsatzes der EDCF . . . . .	93
5.6	Leistungsbewertung der EDCF . . . . .	95
5.6.1	Detaillierte Analyse der Zugriffskategorie 1 . . . . .	95
5.6.2	Vergleich des Durchsatzes der Zugriffskategorien . . . . .	100
5.6.3	Vergleich der neuen EDCF Zugriffskategorien mit 802.11e . . . . .	101
5.6.4	Experimentelle Untersuchung . . . . .	102
5.7	Zusammenfassung . . . . .	105
<b>6</b>	<b>Leistungsbewertung des Netzaufbaus</b>	<b>107</b>
6.1	Einleitung . . . . .	107
6.1.1	Resultierende Netztopologie . . . . .	109
6.2	Simulationsbasierte Untersuchung . . . . .	111
6.3	Leistungsbewertung . . . . .	114
6.4	Experimentelle Validierung . . . . .	116
6.4.1	Prozessorientiertes Interkuppplungskonzept . . . . .	117
6.4.2	Audiovisuelle Positionierung . . . . .	119
6.5	Zusammenfassung . . . . .	122
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung, Fazit und Ausblick</b>	<b>123</b>
7.1	Zusammenfassung . . . . .	123
7.1.1	Prozess-integrierte Ad-hoc-Vernetzung . . . . .	124
7.1.2	Algorithmen zur Interferenzreduktion . . . . .	124
7.1.3	Dienstgüte für den Katastrophenschutz . . . . .	124
7.2	Fazit . . . . .	125
7.3	Ausblick . . . . .	126
<b>A</b>	<b>Forschungsprojekte zur Ad-hoc-Vernetzung im Katastrophenschutz</b>	<b>129</b>
A.1	Projekte des Lehrstuhls mit eigener Beteiligung . . . . .	129
A.1.1	Airshield . . . . .	129
A.1.2	SPIDER . . . . .	131
A.1.3	MORE - Eine Middleware für eingebettete Systeme . . . . .	132
A.1.4	MobileEmerGIS . . . . .	134
A.2	Weitere Projekte . . . . .	135
A.2.1	u2010 . . . . .	135
A.2.2	SoKNOS . . . . .	136
<b>B</b>	<b>Wissenschaftlicher Tätigkeitsnachweis</b>	<b>137</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>141</b>



# Abbildungsverzeichnis

1.1	Anforderungen an Krisenkommunikationstechnik [95] . . . . .	2
1.2	Kommerzielle Mobilfunktechnologien im Überblick [96] . . . . .	4
1.3	Anwendergerechter Netzaufbau mittels <i>InCo Units</i> . . . . .	7
1.4	Wissenschaftliche Vorgehensweise in dieser Dissertation . . . . .	9
1.5	Aufbau der Dissertation . . . . .	11
2.1	Führungsstelle mit Sprechfunk- und Fernsprechbetrieb . . . . .	15
2.2	Kommunikationsskizze des BRK Rettungsdienstes . . . . .	16
2.3	Netzarchitektur bei IEEE 802.11 . . . . .	17
2.4	Automatischer Relayabwurf mittels Relay-Spender [51] . . . . .	22
2.5	EDCA Timing-Diagramm für 802.11e (nach [94]) . . . . .	25
2.6	Multiskalen-Simulationsumgebung mit best-in-class-Tools . . . . .	28
2.7	Zweidimensionale Markov-Kette der DCF (nach [5]) . . . . .	30
3.1	Digitale Lagekarte mit verteilter Darstellung . . . . .	34
3.2	Umsetzung einer Helmkameraübertragung . . . . .	35
3.3	Evolution der Dropped Units . . . . .	36
3.4	Ultra-Mobile Dropped Unit . . . . .	38
3.5	Erste Fresnelzone zwischen Sende- und Empfangsantenne . . . . .	40
3.6	Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus . . . . .	41
3.7	Experimentelles Ergebnis zu unterschiedlichen Antennenhöhen . . . . .	42
3.8	Abdeckungsanalyse der Funkfeldausbreitung für WLAN . . . . .	44
3.9	Simulation des Szenarios in OMNeT . . . . .	45
3.10	Offlinezeit und Verfügbarkeit des zirkulären Erkunders . . . . .	46
3.11	Offlinezeit und Verfügbarkeit eines Truppmanns . . . . .	47
3.12	WLAN-Abdeckung durch einzelnen Access Point unzureichend . . . . .	49
3.13	WLAN Abdeckung durch <i>Dropped Unit</i> erweitert . . . . .	50
3.14	Rettungsequipment für mögliche Integration der <i>Dropped Units</i> . . . . .	51
3.15	Prozesskonformer Netzaufbau für Rettungseinsätze . . . . .	52
3.16	<i>InCo Unit</i> mit teilweise geöffnetem Außenrohr . . . . .	53
3.17	Funktionsmuster einer <i>InCo Unit</i> . . . . .	53
3.18	Modell einer Ausstellungshalle mit Gefahrenstelle . . . . .	54
3.19	Abdeckungsanalyse in RPS der Halle 8 der Koelnmesse . . . . .	55
4.1	Topologien eines Szenarios aus drei Quellknoten . . . . .	59

4.2	Zusammengesetzte Topologie vor und nach Reinigungsprozess . . .	60
4.3	Beispielhafte Ausführung des TIA . . . . .	60
4.4	Netztopologie: Basisstation, InCo Units und Rettungskräfte . . . .	61
4.5	Beispielhafte Platzierung von InCo Units im Szenario 1 . . . . .	66
4.6	Beispielhafte Platzierung von InCo Units im Szenario 2 . . . . .	67
4.7	InCo Units zur Vernetzung mit Basisstation bei 100m Reichweite .	68
4.8	InCo Units zur Vernetzung mit Basisstation bei 200m Reichweite .	69
5.1	Kanalbelegung an der TU Dortmund im 2,4 GHz Band . . . . .	72
5.2	Timing der EDCF Priorisierungskategorien . . . . .	76
5.3	Regel zum Herunterzählen des Backoffs in DCF und EDCA . . . . .	78
5.4	Zeitpunkt des Starts der Übertragung für DCF und EDCA . . . . .	78
5.5	Verteilung der Zeitschlitze für den Fall $DIFS_A = DIFS_B$ . . . . .	79
5.6	Verteilung der Zeitschlitze für den Fall $DIFS_A < DIFS_B$ . . . . .	80
5.7	Markov-Ketten Modell für $AC_A$ . . . . .	82
5.8	Markierte Zustände im Markov Modell für $AC_A$ . . . . .	84
5.9	Markov-Ketten Modell für $AC_B$ . . . . .	86
5.10	Markierte Zustände im Markov Modell für $AC_B$ . . . . .	87
5.11	Markov-Kette zur Modellierung der <i>Backoff-Stages</i> . . . . .	91
5.12	Erfolgreiche Payload-Übertragung . . . . .	94
5.13	Kollision bei einer Payload-Übertragung . . . . .	95
5.14	Übersicht der beiden Szenarien für die Leistungsbewertung . . . . .	96
5.15	OMNeT-Szenario . . . . .	97
5.16	Durchsatz AC1 vs. DCF . . . . .	98
5.17	Durchsatz AC1 vs. AC2 . . . . .	99
5.19	Analytisch ermittelter Durchsatz von Nutzer A . . . . .	100
5.18	Szenario 1vs.1 . . . . .	100
5.20	Simulativ ermittelter Durchsatz von Nutzer A . . . . .	101
5.21	Durchsatz im Wettbewerb von EDCF mit EDCA . . . . .	102
5.22	Messaufbau zur Validierung der EDCF . . . . .	103
5.23	Relative Durchsätze von Messung, Analyse und Simulation . . . . .	104
6.1	3D Modell der Messe in Köln . . . . .	108
6.2	Szenario einer Ausstellungshalle mit vier Sendern . . . . .	110
6.3	Drei Szenarien für die Leistungsbewertung . . . . .	111
6.4	Modellierung des kleinen Szenarios in OMNeT . . . . .	113
6.5	Modellierung der Szenarien in OMNeT ohne IAA . . . . .	114
6.6	Durchschnittliche Verzögerung der empfangenen Pakete . . . . .	115
6.7	PDR bei 768kbit/s angebotenem Verkehr pro Sender . . . . .	115
6.8	Brandhaus der Feuerwehr Gelsenkirchen . . . . .	117
6.9	Videoübertragung von einer Helmkamera zum ELW . . . . .	118
6.10	DU am Eingang . . . . .	118
6.11	Feldtest zur Videoübertragung bei großen Entfernungen . . . . .	119
6.12	Positionen der <i>Dropped Units</i> für den Feldtest an der TU . . . . .	120

6.13 Ergebnisvergleich Feldtest mit Simulation . . . . .	121
A.1 Airshield Quadrocopter . . . . .	130
A.2 Airshield Architektur . . . . .	131
A.3 Schutz- und Rettungsszenario in SPIDER [99] . . . . .	132
A.4 MORE Gesamtarchitektur [98] . . . . .	133
A.5 MobileEmerGIS Systemarchitektur [97] . . . . .	134



# Tabellenverzeichnis

1.1	Genormte Längen für Druckschläuche der Feuerwehr (gemäß [18]) . . . . .	8
2.1	Standardwerte für EDCA Parameter basierend auf [41] . . . . .	26
2.2	Standardwerte für EDCA Parameter von IEEE 802.11a [41]. . . . .	27
2.3	Eingesetzte Hardwareplattformen . . . . .	31
4.1	Symbole und Abkürzungen . . . . .	58
4.2	Datenrate in Abhängigkeit des RSS am Empfänger . . . . .	63
4.3	Parameter der Szenarien . . . . .	66
5.1	Vorgeschlagene Priorisierungskategorien . . . . .	74
5.2	Parameter der EDCA Zugriffskategorien . . . . .	77
5.3	Simulationsparameter . . . . .	97
6.1	Parameter der Simulationsumgebung . . . . .	112

## Abkürzungsverzeichnis

AC	Zugriffskategorie
AIFS	Arbitration Interframe Space
AIFSN	Arbitration Interframe Space Number
AODV	Ad-hoc On-Demand Distance Vector
AP	Access Point
APCO	Association of Public Safety Communications Officials
ARM	Advanced RISC Machines
BATMAN	Better Approach To Mobile Ad-hoc Networking
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
BSS	Basic Service Set
BTS	Base Transceiver Station
CAP	Controlled Access Phase
CDMA	Code Division Multiple Access
CFP	Contention Free Period
CMS	Core Management Service
CNI	Communication Networks Institute
CP	Contention Period
CPU	Central Processing Unit
CTS	Clear To Send
CW	Contention Window
DCF	Distributed Coordination Function
DIFS	DCF Interframe Spaces
DPN	Disconnected Polymorphous Network
EDCA	Enhanced Distributed Channel Access
EDCF	Emergency-DCF
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power - Äquivalente isotrope Sendeleistung
FuG	Funkgerät, gebaut aufgrund eines Pflichtenheftes einer Behörde
GIS	Geographisches Informationssystem
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communications
HCCA	HCF Controlled Channel Access
HCF	Hybrid Coordination Function

HiMoNN	Highly Mobile Network Node
HSPA	High Speed Packet Access
HWMP	Hybrid Wireless Mesh Protokoll
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFS	Inter Frame Space
IP	Internet Protocol
KIT	Krisenintervention im Rettungsdienst
MORE	Network-centric Middleware for Group communication and Resource Sharing across Heterogeneous Embedded Systems
MUAV	Micro Unmanned Aerial Vehicle
NAV	Network Allocation Vector
OGM	Originator Message
OLSR	Optimized Link State Routing
PAN	Personal-Area-Network
PC	Personal Computer
PCF	Point Coordination Function
PIFS	PCF Interframe Space
PRML	Protection and Rescue Markup Language
QAP	QoS Access Point
QBSS	QoS Basic Service Set
QoS	Quality of Service - Dienstgüte
QSTA	QoS supporting Stations
RISC	Reduced Instruction Set Computer - Rechner mit reduziertem Befehlssatz
RS232	Recommended Standard 232 - Serielle Schnittstelle
RTS	Request To Send
SF <sub>DUR</sub>	Dauer eines Superframes
SIFS	Short Interframe Space
SOA	Service-Oriented-Architecture
SOAP	Simple Object Access Protocol
SPIDER	Security System for Public Institutions in Disastrous Emergency scenarios
STA	IEEE 802.11 Station
TBTT	Target Beacon Transmission Time

TETRA	Terrestrial Trunked Radio
TTL	Time-To-Live
TXOP	Transmission Opportunity
UART	Universal Asynchronous Receiver Transmitter
UDP	User Datagram Protocol
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
USB	Universal Serial Bus
UWB	Ultra-Breitband-Technologie
VPN	Virtual Private Network
WAN	Wide-Area-Network
WiFi	Synonym für WLAN
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network
WPA2	WiFi Protected Access 2
XML	Extensible Markup Language
XML-IF	XML-Schnittstelle

## Symbolverzeichnis

$AC_A$	Zugriffskategorie A
$AC_B$	Zugriffskategorie B
$b_{A(r,k)}$	Zustandswahrscheinlichkeit für den Zustand (r,k) in dem zweidimensionalen Markov-Ketten Modell in Abbildung 5.7 für $AC_A$
$b_{B(r,k)}$	Zustandswahrscheinlichkeit für den Zustand (r,k) in dem zweidimensionalen Markov-Ketten Modell in Abbildung 5.9 für $AC_B$
$CW$	Wettbewerbsfenster (engl. <i>Contention Window</i> ) der IEEE 802.11 Backoff Prozedur für den zufallsbasierten Kanalzugriff
$CW_{maxA}$	Maximalgröße des Wettbewerbsfensters für $AC_A$
$CW_{maxB}$	Maximalgröße des Wettbewerbsfensters für $AC_B$
$\Delta_{DIFS}$	Unterschied zwischen $DIFS_A$ und $DIFS_B$
$DIFS_A$	Dauer eines DIFS für die $AC_A$
$DIFS_B$	Dauer eines DIFS für die $AC_B$
$d(k)$	Zustandswahrscheinlichkeit für den Zustand (k) in dem eindimensionalen Markov-Ketten Modell in Abbildung 5.11.
$E[A]$	Durchschnittlicher effektiver Payload für $AC_A$
$E[B]$	Durchschnittlicher effektiver Payload für $AC_B$
$E[P]$	Effektiver Payload in einem Datenframe
$EZ$	die mittlere Zeitdauer zwischen zwei aufeinander folgenden Übertragungen
$P_{bA}$	Wahrscheinlichkeit, dass eine $AC_A$ Station einen belegten Kanal sieht, direkt nachdem die Station einen IFS[A], seit dem Ende der letzten Kanalbelegung, gewartet hat
$P_{bB}$	Wahrscheinlichkeit, dass eine $AC_B$ Station einen belegten Kanal sieht, direkt nachdem die Station einen IFS[B], seit dem Ende der letzten Kanalbelegung, gewartet hat
$P_{col}$	Wahrscheinlichkeit, dass eine Kollision in einem <i>time slot</i> auftritt
$P_{idle}$	Wahrscheinlichkeit, dass für eine Station ein <i>idle time slot</i> auftritt
$P_{idleA}$	Durchschnittliche Wahrscheinlichkeit, dass sich eine $AC_A$ Station in einem <i>idle time slot</i> befindet
$P_{idleB}$	Durchschnittliche Wahrscheinlichkeit, dass sich eine $AC_B$ Station in einem <i>idle time slot</i> befindet
$Pr_{A(r)}$	Wahrscheinlichkeit, dass eine $AC_A$ Station eine Backoff Prozedur mit einem Startwert r beginnt
$Pr_{B(r)}$	Wahrscheinlichkeit, dass eine $AC_B$ Station eine Backoff Prozedur mit einem Startwert r beginnt
$Pr(r)$	Wahrscheinlichkeit, dass eine Station eine neue Backoff Prozedur mit einem Startzahlwert r beginnt
$P_{sB}$	Wahrscheinlichkeit, dass eine $AC_B$ Station einen belegten Kanal sieht, innerhalb des IFS[B] Zeitraums, seit dem Ende der letzten Kanalbelegung

$S_A$	Sättigungsdurchsatz für jede $AC_A$ Station
$S_B$	Sättigungsdurchsatz für jede $AC_B$ Station
$\tau_A$	Sendewahrscheinlichkeit einer $AC_A$ Station
$\tau_B$	Sendewahrscheinlichkeit einer $AC_B$ Station
$T_c$	Verbrauchte Zeit bei einer Kollision
<i>timeslot</i>	Dauer eines IEEE 802.11 Zeitschlitzes
$T_s$	Benötigte Zeit für eine erfolgreiche Übertragung