

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	9
Abbildungsverzeichnis	13
Tabellenverzeichnis	17
1 Einleitung	19
1.1 Einordnung der Arbeit	19
1.2 Motivation und Ziele der Arbeit	20
1.3 Forschungsfragen	22
1.4 Methodik und Vorgehen	23
1.5 Bedeutung des Vorhabens	24
2 Vernetzung von Verkehrsteilnehmern	27
2.1 Grundsätzliche Zielsetzung	27
2.2 Einordnung der Begriffe	29
2.3 Netzarchitekturen	30
2.4 Infrastruktureinbindung	31
2.5 Vulnerable Verkehrsteilnehmer	32
3 Anforderungsanalyse	33
3.1 Sicherheitskritische Anwendungen	34
3.1.1 Eigenschaften sicherheitskritischer Anwendungen	34
3.1.2 Anforderungen an die sicherheitskritische Kommunikation	36
3.2 Zukünftige Anwendungsfälle	42
3.3 Ermittlung der Anforderungen	43
4 Herausforderungen für die V2X-Kommunikation	47
4.1 Funkkanal	47
4.2 Netzarchitektur	50
4.3 Kanalüberlastung	54
4.3.1 Reduktion der Nachrichten	54
4.3.2 Einschränkung des Verbreitungsgebiets	55
4.3.3 Verteilung von Nachrichten	56
4.4 Positionsgenauigkeit und Zeitsynchronität	56
5 Übertragungstechnologien	59
5.1 Technologieübergreifende Eigenschaften und Verfahren	59
5.1.1 Frequenzbereich	59
5.1.2 Nachrichtentypen	60
5.1.3 Decentralized Congestion Control (DCC)	62
5.2 WLAN-basierte V2X-Kommunikation	63
5.2.1 ITS-G5	64
5.2.2 IEEE 802.11bd	67
5.3 Mobilfunkbasierte V2X-Kommunikation	68
5.3.1 LTE-V2X	68
5.3.2 5G-V2X	72

5.4	Weitere Technologien im V2X-Umfeld	73
5.5	Zusammenfassung und Einordnung	76
6	Stand der Forschung zur hybriden V2X-Kommunikation	79
6.1	Ansätze zur hybriden/heterogenen V2X-Kommunikation	81
6.1.1	Statische heterogene V2X-Netze	81
6.1.2	Clustering	83
6.1.3	Einordnung des eigenen Ansatzes für heterogene V2X-Netze	85
6.2	Ausstattungsdaten von Übertragungstechnologien in V2X-Netzen	85
6.3	Ansätze zum Lastmanagement in V2X-Netzen	87
6.3.1	Lastverteilung	87
6.3.2	Lastreduzierung	89
6.3.3	Einordnung	90
6.4	Frequenzbereiche	90
6.4.1	Reichweitenuntersuchungen in V2X-Netzen	90
6.4.2	Multihop-Verfahren	92
6.4.3	Einordnung	92
6.5	V2P-Kommunikation	93
6.6	Einordnung in den allgemeinen Forschungsstand der V2X-Kommunikation	95
7	Messungen	97
7.1	Auswahl der Messszenarien	99
7.2	Messaufbauten für die V2X-Messungen	102
7.2.1	ITS-G5	105
7.2.2	LTE-V2X	105
7.2.3	Antennen	106
7.3	Ergebnisse der V2X-Messungen	106
7.3.1	Umgebungsabhängige Paketverlustraten	107
7.3.2	Latenzen	111
7.3.3	Wirkung der Sendeleistung und Auswahl des Modulationsverfahrens	112
7.3.4	Einflüsse durch umgebenden Verkehr	112
7.3.5	Wettereinflüsse auf die Übertragung	113
7.3.6	Antennenauswahl	114
7.3.7	Interoperabilität zwischen ITS-G5 und LTE-V2X	115
7.4	Bewertung der Messungen	116
8	Modellbildung	119
8.0.1	Abstand und Richtung	119
8.0.2	Geschwindigkeit und Bewegungsrichtung	120
8.0.3	Umgebungsbedingungen	120
8.0.4	Line-of-Sight und Non-Line-of-Sight	121
8.1	Empirischer Ansatz	125
8.2	Neuronales Netz	131
8.2.1	Struktur des neuronalen Netzes	131
8.2.2	Trainings- und Testphase	133
8.2.3	Ergebnisse	134
8.3	Beurteilung der Übertragungsmodelle	135
8.3.1	Räumliches Übertragungsverhalten	135
8.3.2	Weitere Modelle	136

9	Konzepte für hybride V2X-Systeme	139
9.1	Konzepte zur Untersuchung	140
9.1.1	Hybride Kommunikation im V2X-Frequenzbereich	140
9.1.2	Kombinierte Frequenzbereiche	150
9.1.3	Einbindung vulnerabler Verkehrsteilnehmer	152
9.2	Zusammenfassung Konzepte	156
10	Simulationsumgebung	157
10.1	Verkehrssimulation	158
10.1.1	Verkehrsraum	158
10.1.2	SUMO	159
10.2	Umfeldmodellierung	161
10.3	Kommunikationssimulation	162
10.3.1	Anforderungen an die Kommunikationssimulation	163
10.3.2	Eigene Implementierung der Kommunikationssimulation	164
10.3.3	Generierungsmodell für Ereignisse	165
10.3.4	Ermittlung der relevanten Übertragungseigenschaften	167
10.4	Gesamtsimulation	170
10.4.1	Zeitbasis	170
10.4.2	Zentrale Konfiguration der Szenarien	173
10.4.3	Aufzeichnung der Simulationsdaten	174
10.4.4	Steuerung	174
10.5	Szenarien	174
10.5.1	Verkehrsszenarien	175
10.5.2	Anwendungen	179
10.5.3	Zusammenfassung	180
11	Simulation und Ergebnisse	181
11.1	Überprüfung der Modelle	181
11.1.1	Überprüfung des ITS-G5 Übertragungsmodells	182
11.1.2	Überprüfung des LTE-V2X Übertragungsmodells	184
11.2	Referenzmessung	184
11.2.1	Auswahl der Simulationsszenarien	186
11.2.2	Durchführung der Referenzuntersuchung	189
11.2.3	Zusammenfassung und Bewertung der Referenzmessung	198
11.3	Ausstattungsdaten	199
11.3.1	ITS-G5 als Primärtechnologie mit LTE-V2X Unterstützung	201
11.3.2	LTE-V2X als Primärtechnologie mit ITS-G5 Unterstützung	204
11.3.3	Gleichgewichtetes hybrides V2X-Netz	206
11.3.4	Zusammenfassung zur Ausstattungsrate	208
11.4	Lastmanagement	209
11.4.1	Gegenstand der Untersuchung	209
11.4.2	Durchführung der Untersuchung	210
11.4.3	Zusammenfassung zum Lastmanagement	212
11.5	Reichweitenuntersuchung	214
11.5.1	Simulationsszenario	214
11.5.2	Vergleich von 800 MHz Singlehop gegen 5,9 GHz Multihop	215
11.5.3	Hybride V2X-Netze unter Verwendung unterschiedlicher Frequenz- bereiche	216

11.6	Vulnerable Verkehrsteilnehmer	218
11.6.1	Aufbau der Untersuchung zur Einbindung vulnerablen Verkehrsteilnehmer	220
11.6.2	Ergebnisse der Untersuchungen zur Einbindung vulnerabler Teilnehmer	221
12	Zusammenfassung	223
13	Fazit	227
	Literatur	229
A	Verkehrsszenarien in SUMO	245
A.1	Frankfurt University of Applied Sciences	245
A.2	Ländlicher Verkehrsraum	246
A.3	Manhattan Grid	246
A.4	Kombinierter Verkehrsraum	247
B	Diagramme zur Implementierung der Simulationsumgebung	249
C	Szenarien der Messkampagne	251
D	Aufbau der Messsysteme für ITS-G5 und LTE-V2X	253
E	Messungen bei niedrigen Frequenzen	255
E.1	CellMapper und Providerdaten	255
E.2	Applikation der Bundesnetzagentur	257
E.3	Messung im ISM-Band bei 868 MHz	258
E.4	Zusammenfassung der Messreihen	261
F	Simulationsergebnisse	263
F.1	Ergebnisse der Referenzuntersuchungen aus Abschnitt 11.2	263
F.2	Ergebnisse der Untersuchungen zu den Ausstattungsraten aus Abschnitt 11.3	266
G	Veröffentlichungen	277