

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Pervasive Kommunikation | 3 |
| 1.2 | Kommunikation für Intelligente Verkehrssysteme | 4 |
| 1.2.1 | Fahrzeug-zu-Fahrzeug Kommunikation | 5 |
| 1.2.2 | Fahrzeug-zu-Infrastruktur Kommunikation | 6 |
| 1.3 | Drahtlose Kommunikation | 6 |
| 1.3.1 | Die WLAN-Standardfamilie | 9 |
| 1.3.1.1 | IEEE 802.11 | 10 |
| 1.3.1.2 | Erweiterungen der Bitübertragungsschicht | 12 |
| 1.3.1.3 | Extended Service Set und Zellenwechsel | 13 |
| 1.3.1.4 | Sicherheit in WLAN-Netzwerken | 16 |
| 1.3.2 | Drahtlose Kommunikation für ITS-Dienste | 17 |
| 1.3.2.1 | IEEE 802.11p und IEEE 1609.4 | 17 |
| 1.3.2.2 | IEEE 1609.3 | 18 |
| 1.3.2.3 | Weitere Standards | 20 |
| 1.3.3 | WiMAX | 20 |
| 1.3.4 | Mobilfunkstandards für Breitbandkommunikation | 21 |
| 1.3.4.1 | UMTS | 22 |
| 1.3.4.2 | LTE | 24 |
| 1.3.4.3 | Infrastrukturtechnologien | 24 |
| 1.4 | Motivation | 25 |
| 1.5 | Zielsetzung der Arbeit | 29 |
| 1.5.1 | Anforderungen | 30 |
| 1.5.2 | Themenschwerpunkte | 33 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1.5.3 | Thematische Abgrenzung | 34 |
| 1.6 | Aufbau der Arbeit | 35 |
| 2 | Stand der Forschung und Klassifikationsschemata | 41 |
| 2.1 | Backbone- und Zugriffsnetzwerke | 43 |
| 2.1.1 | Modellierung von Netzwerken | 43 |
| 2.1.2 | Topologien von Backbone-Netzwerken | 51 |
| 2.1.3 | Bewertung ausgewählter Eigenschaften von Backbone-Netzwerken | 54 |
| 2.1.4 | Datensicherheit und -integrität | 60 |
| 2.1.5 | Selbstorganisation und -konfiguration | 62 |
| 2.2 | Vehicular Ad-hoc Networks (VANETs) | 64 |
| 2.3 | Roadside-Backbone-Netzwerke (RBNs) | 66 |
| 2.3.1 | Topologien in anderen Arbeiten | 68 |
| 2.3.2 | Technologien in anderen Arbeiten | 72 |
| 2.3.3 | Mobilitätsmanagement in anderen Arbeiten | 73 |
| 2.3.3.1 | Verfahren auf Schicht 2 | 74 |
| 2.3.3.2 | Verfahren auf Schicht 3 | 75 |
| 2.3.4 | Lastbalancierung in anderen Arbeiten | 77 |
| 2.3.4.1 | Ortsbasierte Verfahren | 78 |
| 2.3.4.2 | Zeitbasierte Verfahren | 79 |
| 2.4 | Zusammenfassung | 82 |
| 3 | Strukturentwurf von Roadside-Backbone-Netzwerken | 85 |
| 3.1 | Rahmenbedingungen für RBNs | 86 |
| 3.1.1 | Geographische Abdeckung und Bandbreite | 87 |
| 3.1.2 | Kosten | 94 |
| 3.1.3 | Übertragungszeiten und Länge des Kommunikationspfades | 99 |
| 3.1.4 | Robustheit | 103 |
| 3.1.5 | Skalierbarkeit | 113 |
| 3.1.6 | Zusammenfassung | 117 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 3.2 | Logische Netzwerkknoten | 118 |
| 3.3 | Logische Verbindungen | 125 |
| 3.4 | Technologien | 127 |
| 3.4.1 | Urbane Regionen | 128 |
| 3.4.2 | Ländliche Regionen | 130 |
| 3.4.3 | Zusammenfassung und Leistungsdaten | 131 |
| 3.5 | Ausstattung von Verkehrswegen | 131 |
| 3.5.1 | Eigenschaften der Verkehrswege | 134 |
| 3.5.2 | Allokation von AHs und ANs | 134 |
| 3.5.3 | Cluster-Dimensionierung | 138 |
| 3.6 | Detailmodellierung | 138 |
| 3.6.1 | Leistungseigenschaften | 139 |
| 3.6.2 | Fahrzeugbewegung | 142 |
| 3.7 | Zusammenfassung | 154 |
| 4 | Funktionsprinzipien von Roadside-Backbone-Netzwerken | 157 |
| 4.1 | Anforderungen der Dienste | 158 |
| 4.2 | Modellanalyse | 161 |
| 4.2.1 | Bandbreiten | 161 |
| 4.2.2 | Routing | 164 |
| 4.2.3 | Schlussfolgerungen | 165 |
| 4.3 | Selbstorganisation und -konfiguration | 166 |
| 4.4 | Datensicherheit und -integrität | 176 |
| 4.5 | Hierarchisches und von der Position abstrahierendes Routing . | 178 |
| 4.5.1 | Klassen von Datenpaketen | 178 |
| 4.5.1.1 | Richtung der Kommunikation | 178 |
| 4.5.1.2 | Kommunikationsprotokolle | 179 |
| 4.5.1.3 | Zweck der Kommunikation | 179 |
| 4.5.2 | Routing von Kontrolldaten | 181 |
| 4.5.3 | Routing von Nutzdaten | 182 |
| 4.5.3.1 | Integration von WSMP | 183 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.5.3.2 | Entkopplung von RBN und Endknotennetzwerk | 184 |
| 4.5.3.3 | Routing und Lastbalancierung innerhalb des RBNs | 191 |
| 4.5.3.4 | Effektivität und Effizienz | 192 |
| 4.6 | Unterstützung von Kommunikationsparadigmen für ITS . . . | 193 |
| 4.6.1 | Geographischer Bezug | 193 |
| 4.6.2 | Temporärer Bezug | 195 |
| 4.6.3 | Semantischer Bezug | 196 |
| 4.7 | Mobilitätsmanagement | 198 |
| 4.7.1 | Positionsbestimmung | 201 |
| 4.7.2 | Prognose zukünftiger Positionen | 202 |
| 4.7.3 | Abonnentenverwaltung | 203 |
| 4.8 | Zusammenfassung | 204 |
| 5 | Mobilitätsbezogene Datenweiterleitung im Voraus | 205 |
| 5.1 | MAFIA und PARP im Vergleich | 206 |
| 5.2 | Bandwidth Wall und grundlegende Funktionsweise | 208 |
| 5.3 | Formales Modell | 210 |
| 5.3.1 | Bandbreitenmodell | 210 |
| 5.3.2 | Routing für Nutzdatenpakete | 211 |
| 5.3.3 | Nutzdatenpakete als Datenfluss und Datenflussblock . | 213 |
| 5.3.4 | Servicekurven | 214 |
| 5.3.5 | Planungszeit | 219 |
| 5.3.6 | Prognose der Position und Vorhersagefehler | 221 |
| 5.4 | Planungsalgorithmus | 223 |
| 5.5 | Komponenten | 227 |
| 5.5.1 | MAFIA-Sender | 227 |
| 5.5.2 | MAFIA-Empfänger | 231 |
| 5.6 | Effektivität in Abhängigkeit der Datenflusseigenschaften . . . | 233 |
| 5.7 | Zusammenfassung | 234 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 6 | Referenzimplementierung | 235 |
| 6.1 | Das RBN als verteiltes System | 236 |
| 6.1.1 | Identifikation der Subsysteme logischer Netzwerkknoten | 237 |
| 6.1.2 | Software | 240 |
| 6.1.3 | Kommunikation zwischen Subsystemen | 243 |
| 6.1.4 | Kommunikation zwischen logischen Netzwerkknoten | 244 |
| 6.1.5 | Hardware | 245 |
| 6.2 | OPAL-VCN als Beispiel | 249 |
| 6.2.1 | Hardware-Plattform mit hoher Leistung | 250 |
| 6.2.2 | Hardware-Plattform mit geringer Leistung | 251 |
| 6.2.3 | Logische und physische Netzwerkknoten | 252 |
| 6.2.4 | Technologien | 254 |
| 6.2.5 | Technische Besonderheiten | 255 |
| 6.3 | Zusammenfassung | 256 |
| 7 | Evaluation | 257 |
| 7.1 | Routing | 257 |
| 7.2 | MAFIA | 260 |
| 7.2.1 | Systemmodell | 261 |
| 7.2.1.1 | Vereinfachtes RBN-Modell | 261 |
| 7.2.1.2 | Verbindungsfreigabe mit MAFIA | 263 |
| 7.2.1.3 | Verbindungsfreigabe ohne MAFIA | 263 |
| 7.2.1.4 | Verkehrsmodell | 265 |
| 7.2.1.5 | Datenflüsse | 267 |
| 7.2.1.6 | Mobilitätsmanagement | 267 |
| 7.2.1.7 | Untersuchungsgegenstand | 268 |
| 7.2.2 | Umsetzung des Simulationswerkzeugs | 268 |
| 7.2.3 | Simulationsszenarien und Ergebnisse | 270 |
| 7.2.3.1 | Szenario 1 | 272 |
| 7.2.3.2 | Szenario 2 | 275 |
| 7.2.3.3 | Szenario 3 | 277 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7.2.3.4 | Szenario 4 | 278 |
| 7.3 | Zusammenfassung | 281 |
| 8 | Zusammenfassung und Ausblick | 283 |
| 8.1 | Ergebnisse | 284 |
| 8.2 | Weiterführende Forschungsaufgaben | 290 |
| | Literaturverzeichnis | 293 |