

# Inhaltsverzeichnis

|  |      |
|--|------|
| Abbildungsverzeichnis .....  | VIII |
| Tabellenverzeichnis .....  | XII  |
| Abkürzungsverzeichnis .....  | XIII |
| 1 Einleitung .....   | 1    |
| 1.1 Problemstellung und Motivation.....  | 3    |
| 1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen .....   | 5    |
| 1.3 Forschungskonzeption und Aufbau der Arbeit.....  | 6    |
| 2 Grundlagen, Methoden und Bezugsrahmen der 5G Ortung.....   | 9    |
| 2.1 Beschreibung der angewandten Methodik und Modelle.....   | 9    |
| 2.1.1 Vorgehen der systematischen Literaturrecherche.....  | 9    |
| 2.1.2 Methodik der leitfadengestützten Experteninterviews .....                                    | 14   |
| 2.1.3 Grundlagen der Konzeptentwicklung.....   | 18   |
| 2.2 Grundlagen des Mobilfunkstandards 5G .....   | 18   |
| 2.2.1 Entwicklung der Mobilfunkstandardisierung .....  | 19   |
| 2.2.2 Technischer Hintergrund des Mobilfunkstandards 5G .....                                      | 21   |
| 2.3 Theoretische Grundlagen der Funkfrequenzortung.....  | 27   |
| 2.3.1 Grundlagen der zeitbasierten Positionsberechnung.....  | 33   |
| 2.3.2 Grundlagen der winkelbasierten Positionsberechnung .....                                     | 37   |
| 2.3.3 Grundlagen der signalbasierten Positionsberechnung.....                                      | 38   |
| 2.3.4 Grundlagen der Signalanalyse für die Funkortung .....  | 41   |
| 2.3.5 Filterungen und Optimierungsansätze der Funkortung .....                                     | 44   |
| 2.4 Eigenschaften und Vergleich der bisherigen RTLS-Technologien .....                             | 58   |
| 2.4.1 Historie der Echtzeit-Lokalisierungssysteme (RTLS) .....                                     | 60   |
| 2.4.2 Beschreibung der Ortungstechnologie: Ultra Wideband (UWB)....                                | 62   |
| 2.4.3 Beschreibung der Ortungstechnologie: Radio Frequency Identification (RFID).....              | 64   |
| 2.4.4 Beschreibung der Ortungstechnologie: Bluetooth Low Energy .....                              | 64   |
| 2.4.5 Beschreibung der Ortungstechnologie: Wi-Fi.....  | 65   |
| 2.4.6 Beschreibung der Ortungstechnologie: Mobilfunkstandards .....                                | 73   |
| 3 Literaturübersicht der 5G Ortung und RTLS im Kontext der industriellen Automobilproduktion ..... | 75   |
| 3.1 Entwicklung der Standardisierung von 5G Ortung.....  | 75   |
| 3.2 Literaturübersicht der 5G Ortungs-Forschung .....  | 81   |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 3.3   | RTLS im Kontext der Automobilindustrie.....  | 84  |
| 3.3.1 | Industrielle Anforderungen an die Lokalisierung .....  | 85  |
| 3.3.2 | Aktuelle RTLS-Technologien in der industriellen<br>Automobilproduktion .....                               | 92  |
| 3.4   | Stand der Technik der Wi-Fi Ortung im industriellen Umfeld.....  | 94  |
| 3.4.1 | Verfügbarkeit und Übersicht der getesteten Wi-Fi Geräte.....   | 94  |
| 3.4.2 | Methodik der Wi-Fi Ortungstests .....  | 95  |
| 3.4.3 | Ergebnisse der Wi-Fi Ortungs-Messungen .....   | 101 |
| 3.5   | Zusammenfassung der Literaturübersicht: 5G Ortung im Kontext<br>der industriellen Automobilproduktion..... | 106 |
| 4     | Bestandsaufnahme des Entwicklungsstandes zur Nutzung von 5G als RTLS                                       | 109 |
| 4.1   | Identifikation und Beschreibung der Interviewexperten.....   | 109 |
| 4.2   | Durchführung der empirischen Untersuchung .....  | 112 |
| 4.3   | Ergebnisse der Experten-Interviews.....  | 113 |
| 4.3.1 | Expertenmeinung zum Stand der Technik .....  | 114 |
| 4.3.2 | Expertenmeinung zum Vergleich von 5G und herkömmlich<br>genutzten RTLS.....                                | 115 |
| 4.3.3 | Expertenmeinung zur Standardisierung der 5G Ortung .....   | 116 |
| 4.3.4 | Expertenmeinung zum Energieverbrauch .....   | 117 |
| 4.3.5 | Expertenmeinung zur Sicherheit .....   | 118 |
| 4.3.6 | Expertenmeinung zur Netzplanung .....  | 119 |
| 4.4   | Fazit der Bestandsaufnahme: 5G als RTLS in der industriellen<br>Automobilproduktion .....                  | 119 |
| 5     | Konzeptentwicklung zur Nutzung von 5G als RTLS in der industriellen<br>Automobilproduktion .....           | 121 |
| 5.1   | Integrationsschritte für RTLS in die industrielle Produktion .....   | 122 |
| 5.2   | Anwendungsfall-Analyse für die industrielle 5G Ortung .....  | 123 |
| 5.3   | Analyse der technischen Machbarkeit .....  | 125 |
| 5.3.1 | 5G Ortung im Forschungsaufbau .....  | 125 |
| 5.3.2 | Durchführung der 5G Ortungs-Simulation in realen<br>Umgebungsbedingungen .....                             | 127 |
| 5.3.3 | Ergebnisse der technischen Machbarkeit.....  | 130 |
| 5.4   | Analyse der wirtschaftlichen Machbarkeit.....  | 137 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 6     | Praktische Validierung des Konzepts nur Nutzung von 5G als RTLS in der Automobilproduktion .....                       | 141 |
| 6.1   | Aufbau und Eigenschaften des Praxistests .....   | 141 |
| 6.1.1 | Identifikation der Testflächen.....  | 142 |
| 6.1.2 | Aufbau und Kalibrierung des 5G Systems.....  | 143 |
| 6.1.3 | Aufnahme und Analyse der Messdaten.....  | 150 |
| 6.2   | Auswertung des industriellen Praxistests der 5G Ortung .....   | 156 |
| 6.2.1 | Pilotierung der 5G Ortung im Referenz-Anwendungsfall „Finde mein UE“ .....   | 156 |
| 6.2.2 | Pilotierung der 5G Ortung im Referenz-Anwendungsfall „Materialfluss“ .....   | 164 |
| 6.2.3 | Pilotierung der 5G Ortung im Referenz-Anwendungsfall „Prozessautomatisierung“.....                                     | 167 |
| 6.2.4 | Pilotierung von dynamischen Messungen des Referenz - Anwendungsfall „Materialfluss“ .....                              | 169 |
| 6.3   | Auswirkung von Filterungen und Ausreißer-Erkennung auf die dynamischen Ortungsergebnisse .....                         | 176 |
| 6.4   | Integration der generierten Ortungsdaten in ein Produktionssystem am Beispiel der Ortungsplattform der BMW Group ..... | 182 |
| 6.4.1 | Vorstellung einer operativen Ortungsplattform anhand des Industriebeispiels der BMW Group.....                         | 182 |
| 6.4.2 | Anbindung der 5G Ortungsdaten an die Ortungs- und Lokalisierungsplattform.....   | 185 |
| 6.5   | Anwendung eines ganzheitlichen Systemmodells für die effektive Integration der 5G Ortung .....                         | 188 |
| 6.5.1 | Entwicklung des SMID-Modells .....   | 188 |
| 6.5.2 | Beschreibung des SMID-Modells .....  | 191 |
| 6.5.3 | Anwendung und Ergebnisse des SMID-Modells zur produktiven Integration der 5G Ortung .....                              | 192 |
| 6.6   | Fazit zum Konzept der Nutzung von 5G als RTLS in der industriellen Automobilproduktion .....                           | 195 |
| 7     | Schlussbetrachtung .....   | 199 |
| 7.1   | Zusammenfassung .....  | 199 |
| 7.2   | Kritische Reflexion .....  | 202 |
| 7.3   | Weiterer Forschungsbedarf .....  | 204 |
|       | Literaturverzeichnis .....   | 205 |
|       | Anhangsverzeichnis .....   | 221 |