

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis VIII

Tabellenverzeichnis XII

Abkürzungsverzeichnis XIII

1 Einleitung 1

1.1 Problemstellung und Motivation.....3

1.2 Zielsetzung und Forschungsfragen5

1.3 Forschungskonzeption und Aufbau der Arbeit.....6

2 Grundlagen, Methoden und Bezugsrahmen der 5G Ortung9

2.1 Beschreibung der angewandten Methodik und Modelle9

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 5G21

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 Positionsberechnung38

2.3.4 Grundlagen der Signalanalyse für die Funkortung41

2.3.5 Filterungen und Optimierungsansätze der Funkortung 44

2.4 Eigenschaften und Vergleich der bisherigen RTLS-Technologien58

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 Energy64

2.4.5 Beschreibung der Ortungstechnologie: Wi-Fi.....65

2.4.6 Beschreibung der Ortungstechnologie: Mobilfunkstandards73

3 Literaturübersicht der 5G Ortung und RTLS im Kontext der industriellen Automobilproduktion75

3.1 Entwicklung der Standardisierung von 5G Ortung.....75

3.2 Literaturübersicht der 5G Ortungs-Forschung81

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 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 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 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 Automobilproduktion	119
5	Konzeptentwicklung zur Nutzung von 5G als RTLS in der industriellen 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 Umgebungsbedingungen	127
5.3.3	Ergebnisse der technischen Machbarkeit.....	130
5.4	Analyse der wirtschaftlichen Machbarkeit.....	137

6 Praktische Validierung des Konzepts zur 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