

Beiträge aus der Informationstechnik

Mobile Nachrichtenübertragung

Nr. 101

**Andreas Traßl**

**Hochzuverlässige Drahtloskommunikation durch  
vorhersagegestützte Funkressourcenallokation**

 VOGT

Dresden 2024

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im  
Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Bibliographic Information published by the Deutsche Nationalbibliothek  
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche  
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available on the Internet  
at <http://dnb.dnb.de>.

Zugl.: Dresden, Techn. Univ., Diss., 2024

Die vorliegende Arbeit stimmt mit dem Original der Dissertation  
„Hochzuverlässige Drahtloskommunikation durch vorhersagegestützte  
Funkressourcenallokation“ von Andreas Traßl überein.

© Jörg Vogt Verlag 2024  
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.

Gesetzt vom Autor

ISBN 978-3-95947-072-8

Jörg Vogt Verlag  
Niederwaldstr. 36  
01277 Dresden  
Germany

Phone: +49-(0)351-31403921  
Telefax: +49-(0)351-31403918  
e-mail: [info@vogtverlag.de](mailto:info@vogtverlag.de)  
Internet : [www.vogtverlag.de](http://www.vogtverlag.de)

Technische Universität Dresden

**Hochzuverlässige  
Drahtloskommunikation durch  
vorhersagegestützte  
Funkressourcenallokation**

Dipl.-Ing.  
**Andreas Traßl**

der Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik der  
Technischen Universität Dresden zur Erlangung des  
akademischen Grades

**Doktoringenieur**  
(Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

*Vorsitzender:* Prof. Dr.-Ing. Peter Birkholz

*Gutachter:* Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Fettweis  
Prof. Dr.-Ing. Klaus David

*Tag der Einreichung:* 28.11.2023

*Tag der Verteidigung:* 16.05.2024

**Andreas Traßl**

*Hochzuverlässige Drahtloskommunikation durch vorhersagegestützte Funkressourcenallokation*

Dissertation

**Vodafone Stiftungslehrstuhl für Mobile Nachrichtensysteme**

Institut für Nachrichtentechnik

Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik

Technische Universität Dresden

01062 Dresden

# Kurzfassung

Seit den ersten digitalen Mobilfunknetzen waren besonders Datenrate und Kapazität Hauptoptimierungsziele für neue Funkssysteme. Seit der fünften Generation Mobilfunk (5G) konzentrierten sich Anstrengungen auch auf die Optimierung von Latenz und Zuverlässigkeit der Datenübertragung. Für ultra-zuverlässige Kommunikation mit niedriger Latenz (URLLC) wurden Lösungen erforscht, um eine hohe Erfolgswahrscheinlichkeit der Datenübertragung von 99,999 % innerhalb eines Latenzbudgets von 1 ms zu erreichen. Vorgeschlagene Lösungen, zum Beispiel Multi-Konnektivität, realisieren dies durch Einbringen von zusätzlicher Redundanz in die Übertragungskette. Durch den großen Bedarf an Redundanz weisen diese Verfahren allerdings einen hohen Funkressourcenbedarf auf, welche die Kosten für neue Anwendungen treiben. Für die sechste Generation Mobilfunk (6G) sollen noch strengere Latenz- und Zuverlässigkeitswerte, mehr URLLC-Geräte pro Funkzelle und neue Anwendungen ermöglicht werden, die Zuverlässigkeit und Latenz bei gleichzeitig hoher Datenrate benötigen. Ein effizienterer Umgang mit den verfügbaren Funkressourcen wird dann unerlässlich.

In dieser Arbeit wird die Übertragung von erweiterter Realität (AR) Videostreams analysiert, die eine geringe Übertragungslatenz bei gleichzeitig hoher Datenrate benötigen. Über die Modellierung einer geeigneten Videocodierung als Markov-Kette werden Anforderungen an das Kommunikationssystem quantifiziert. Bei der Übertragung von erweiterter Realität (AR)-Videostreams gilt es Latenzwerte von 10 ms bei einer Erfolgswahrscheinlichkeit der Übertragung von 99,9 % zu erreichen. Gleichzeitig steigt die durchschnittliche Datenrate mit 17 Mbit/s pro Nutzer gegenüber typischen industriellen URLLC-Anwendungen deutlich. Für einen geringeren Funkressourcenbedarf von URLLC wird in dieser Arbeit eine auf Kanalinformationen beruhende Auswahl von Funkressourcen vorgeschlagen und untersucht. Die vorgeschlagene Ressourcenzuweisung nutzt Diversität ohne zusätzliches Einbringen von Redundanz. Um den Ressourcenaufwand für das Erlangen der benötigten Kanalinformationen gering zu halten werden Kanalprädiktionen eingesetzt. Für Vorhersagehorizonte bis zur Kohärenzzeit des Kanals kann eine ausreichend hohe Prädiktionsgenauigkeit für die Ressourcenzuweisung erzielt werden. Die Leistung einer auf fehlerbehafteten Kanalprädiktionen beruhenden Ressourcenzuweisung zeigt eine vielversprechende Zuverlässigkeit, die vergleichbar zu Systemen mit Multi-Konnektivität ist.



# Abstract

Since the introduction of the first digital mobile communications systems, data rate and capacity have been the main optimization goals for new radio systems. Since the fifth generation mobile communications systems (5G), efforts are now also focused on optimizing latency and reliability of the transmission. For ultra-reliable low-latency communications (URLLC), solutions have been explored to achieve a high transmission success probability of 99.999% within a latency budget of 1 ms. Proposed solutions, for example multi-connectivity, realize this by adding additional redundancy to the transmission. However, due to the large amount of redundancy required, these techniques have a high radio resource consumption, which drive the cost of new applications. For the sixth generation mobile communications systems (6G), the goal is to enable even tighter latency and reliability levels, more URLLC devices per radio cell, and novel applications that require reliability and latency while maintaining high data rates. A more efficient use of available radio resources will then become even more crucial.

In this work, the transmission of augmented reality (AR) video streams with low latency and high data rate requirements is analyzed. Requirements for the communications system are quantified by modeling a suitable video coding technique as a Markov chain. When transmitting AR video streams, latency values of 10 ms at a transmission success probability of 99.9% are required. At the same time, the required average data rate of 17 Mbit/s per user increases significantly compared to typical industrial URLLC applications. To achieve a lower radio resource consumption of URLLC, a radio resource allocation based on channel information is proposed and investigated in this work. The proposed resource allocation leverages diversity without the need of introducing additional redundancy. Channel predictions are used to keep the resource overhead for obtaining the required channel information low. For prediction horizons up to the coherence time of the channel, sufficiently high prediction accuracy can be obtained for URLLC resource allocation. The performance of a resource allocation based on error-prone channel predictions shows promising reliability comparable to systems with multi-connectivity.





# Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen Dank aussprechen für die zahlreiche Unterstützung, die ich während meiner Arbeit am Vodafone Stiftungslehrstuhl Mobile Nachrichtensysteme erhalten habe. Die Anfertigung dieser Arbeit wäre ohne diese Unterstützung nicht möglich gewesen.

Besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Gerhard Fettweis. Vor allem das entgegengebrachte Vertrauen bei neuen Aufgaben und seine Führung in Forschungsfragen haben mich und meine Arbeit am Lehrstuhl geprägt.

Ich möchte mich bei meinen Kollegen für die zahlreichen Diskussionen zur Verfeinerung der Forschungsarbeit und die erhaltene Unterstützung während meiner Zeit am Lehrstuhl bedanken. Spezieller Dank gilt Norman, der meine Arbeit in meinen ersten Jahren am Lehrstuhl leitend unterstützt hat, sowie meinen früheren Diplomarbeitsbetreuern Tom und Lucas, die auch während meiner Beschäftigung am Lehrstuhl nicht müde waren, sich über Fragen und Probleme regelmäßig auszutauschen. Ich danke meiner späteren Forschungsgruppe Nick, Friedrich und Richard für das offene Miteinander und die gemeinsamen Diskussionen, Eva für die zahlreichen Konsultationen zu Schätzproblemen, sowie Philipp für die Unterstützung bei der Lösung von Teilproblemen in dieser Arbeit.

Gesondert möchte ich mich auch bei meiner Familie für ihre bedingungslose Zuwendung seit jeher bedanken und bei meinen lieben Freunden für ihre ermutigende Unterstützung.



Zu Teilen gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie des Bundes und der Länder – EXC 2050/1 – Projektnummer 390696704 – als Exzellenzcluster „Centre for Tactile Internet with Human-in-the-Loop“ (CeTI) der Technischen Universität Dresden.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation . . . . .	1
1.2	Beitrag der Arbeit . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Stand der Technik</b>	<b>7</b>
2.1	Zuverlässigkeit von Funkübertragungen . . . . .	7
2.2	Einfluss des Funkkanals auf die Zuverlässigkeit . . . . .	8
2.3	Verfahren für hohe Zuverlässigkeit . . . . .	10
2.4	Zusammenfassung und Fazit . . . . .	14
<b>3</b>	<b>Kommunikationsanforderungen der erweiterten Realität</b>	<b>15</b>
3.1	Übertragung von Videos mit niedriger Latenz . . . . .	17
3.1.1	Beschreibung des Streaming-Systems . . . . .	17
3.1.2	Modellierung . . . . .	19
3.1.3	Leistungskennzahlen . . . . .	21
3.2	Parametrisierung und Validierung des Modells . . . . .	23
3.2.1	Videodatensatz für Erweiterte Realität-Anwendungen . . . . .	23
3.2.2	Parameterwahl . . . . .	27
3.2.3	Validierung . . . . .	29
3.3	Zuverlässigkeitsanforderungen . . . . .	34
3.4	Datenratenanforderungen . . . . .	35
3.5	Zusammenfassung und Fazit . . . . .	36
<b>4</b>	<b>Kanalvorhersage für die Bewertung von Funkressourcen</b>	<b>39</b>
4.1	Klassische Anwendungsbereiche für Funkkanalvorhersagen . . . . .	40
4.2	Systemmodell . . . . .	41
4.2.1	Kanalüberwachungsverzögerung . . . . .	41
4.2.2	Kanalschätzung . . . . .	42
4.2.3	Ausfall von Schwundkanälen . . . . .	43
4.3	Prädiktion von Ausfällen . . . . .	44
4.3.1	Rayleigh-Kanäle . . . . .	45
4.3.2	Rice-Kanäle . . . . .	48

4.4	Leistungskennzahlen . . . . .	52
4.5	Numerische Evaluation . . . . .	54
4.5.1	Parameterwahl . . . . .	55
4.5.2	Einfluss der Prädiktorparameter . . . . .	55
4.5.3	Einfluss der Prädiktion auf die Ressourcenallokation . . . . .	59
4.6	Zusammenfassung und Fazit . . . . .	63
<b>5</b>	<b>Vorhersagegestützte Allokation von Funkressourcen</b>	<b>65</b>
5.1	Stand der Technik . . . . .	66
5.2	Systemmodell . . . . .	67
5.3	Optimierungsziel . . . . .	68
5.4	Vorgeschlagener Allokationsalgorithmus . . . . .	68
5.5	Analytische Zuverlässigkeitsschranken . . . . .	71
5.5.1	Untere Schranke . . . . .	71
5.5.2	Obere Schranke . . . . .	72
5.6	Numerische Evaluation . . . . .	76
5.6.1	Einfluss der Kanalprädiktion . . . . .	76
5.6.2	Zuverlässigkeitsschranken . . . . .	79
5.7	Zusammenfassung und Fazit . . . . .	80
<b>6</b>	<b>Erweiterung für ungleiche mittlere Signal-Rausch-Verhältnisse</b>	<b>81</b>
6.1	Systemmodell . . . . .	82
6.2	Relative Max-Min-Optimierung . . . . .	84
6.3	Regelung des Kanalschätzungs-SNR . . . . .	85
6.4	Numerische Evaluation . . . . .	85
6.4.1	Relative Max-Min-Optimierung . . . . .	86
6.4.2	Regelung des Kanalschätzungs-SNR . . . . .	88
6.5	Zusammenfassung und Fazit . . . . .	91
<b>7</b>	<b>Gesamtzusammenfassung und Ausblick</b>	<b>93</b>
7.1	Ergebnisse der Arbeit . . . . .	93
7.2	Ausblick . . . . .	95
<b>A</b>	<b>Stationäre Zustandswahrscheinlichkeiten des Streaming-Modells</b>	<b>99</b>
<b>B</b>	<b>Datenratenanforderungen konventioneller Streaming-Anwendungen</b>	<b>101</b>
<b>C</b>	<b>Schätzung eines Rice-Kanals aus verrauschten Kanalbeobachtungen</b>	<b>103</b>
<b>D</b>	<b>Tatsächliche Kanalleistung nach Sortierung von Kanalbeobachtungen</b>	<b>107</b>

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>109</b>
<b>Symbolverzeichnis</b>	<b>111</b>
<b>Literatur</b>	<b>121</b>
<b>Publikationen des Autors</b>	<b>129</b>

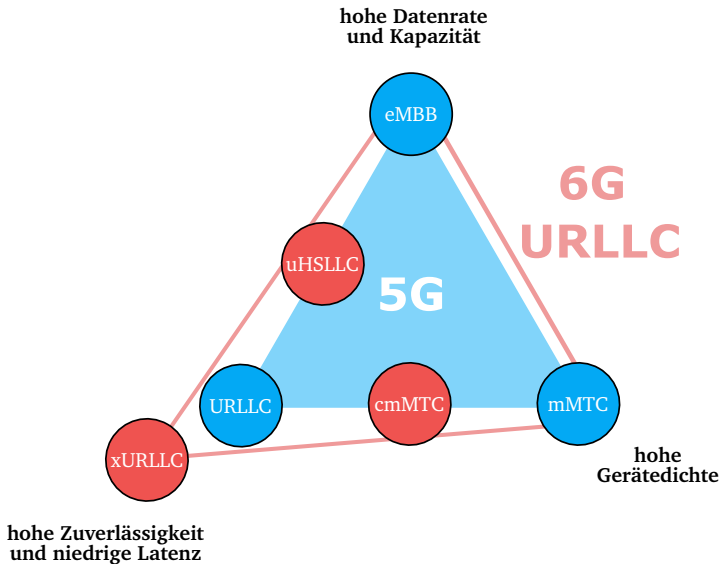




Technische Lösungen, beispielsweise im Transport, in der Produktion oder der Informationstechnik, müssen im Rahmen ihrer Anforderungen zuverlässig funktionieren. Mit der fünften Generation Mobilfunk (5G) wurde Zuverlässigkeit zusammen mit Anforderungen an eine niedrige Übertragungslatenz auch zum erklärten Optimierungsziel für Drahtloskommunikation. Auch für die sechste Generation Mobilfunk (6G) wird Zuverlässigkeit als wichtige Leistungskennzahl diskutiert. Bei der Diskussion um Anforderungen an die neuen Mobilfunkgeneration stellt sich aber zunehmend die Frage, wie der Bedarf an Funkressourcen für die Erzielung der angestrebten Zuverlässigkeit realisiert werden kann. Das nachfolgende Kapitel motiviert die Dissertation und fasst die Beiträge der Arbeit zusammen.

## 1.1 Motivation

Um eine Vielzahl von Anwendungen zu bedienen, wurden in 5G die in Abb. 1.1 dargestellten Anwendungsprofile verbessertes mobiles Breitband (engl. *enhanced mobile broadband*, eMBB), massive Maschinenkommunikation (engl. *massive machine-type communications*, mMTC) und ultrazuverlässige Kommunikation mit niedriger Latenz (engl. *ultra-reliable low-latency communications*, URLLC) eingeführt [ITU15]. Das Anwendungsprofil eMBB wurde für Anwendungen mit hohen Datenratenanforderungen etabliert. Zum eMBB-Profil gehören Multimedia-Anwendungen, zum Beispiel hochauflösendes Videostreaming oder Videotelefonie. Als eine Fortführung der datenratengetriebenen Mobilfunkentwicklung in den vorangegangenen Mobilfunkgenerationen ist das Hauptoptimierungsziel die erzielbare Datenrate und die Kapazität des Netzwerks. Das mMTC-Profil wurde für sensorische Überwachung im Kontext des Internets der Dinge geschaffen [Daw+16], zum Beispiel zur Überwachung von Temperatur, Feuchtigkeit und Nährstoffgehalt in der Landwirtschaft. Neben hohen Gerätedichten sind insbesondere Energieeffizienz und Netzabdeckung wichtige Optimierungsziele des mMTC-Profiles. Das URLLC-Profil wurde für zuverlässige Drahtloskommunikation zwischen Maschinen in Echtzeit entwickelt. Im URLLC-Anwendungsprofil wird primär die industrielle Produktion adressiert. Dabei wird das Ziel verfolgt durch kabellose Vernetzung kürzere Produktzyklen, höhere



**Abb. 1.1.:** 5G Anwendungsprofile (blau) und mögliche Weiterentwicklungen des URLLC-Profils in 6G (rot)

Produktindividualisierung und mehr Flexibilität zu ermöglichen [Las+14]. Neben der Vernetzung von Maschinen ist auch Konnektivität zwischen Mensch und Maschine im Kontext des taktilen Internets denkbar [Fet14; Fit+21a]. Im taktilen Internet wird durch eine geringe Übertragungslatenz eine natürliche Interaktion über große Distanzen ermöglicht. Abhängig von der konkreten Anwendung ergeben sich hohe Anforderungen im Hinblick auf Latenz und Zuverlässigkeit der Übertragung. Das Ziel einer URLLC-Übertragung in 5G ist eine Latenz von 1 ms bei einer durchschnittlichen Erfolgswahrscheinlichkeit von 99,999 % als Maß für die Zuverlässigkeit [3GP18].

Mögliche Ziele von 6G sind zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit vielfältig. Ideen für die Entwicklung des zukünftigen Mobilfunkstandards umfassen auf der einen Seite Paradigmenwechsel abseits der klassischen Optimierungsziele in früheren Mobilfunkgenerationen, zum Beispiel eine genaue Positionierung der Endgeräte [Beh+22], die Maximierung von Sicherheit, Geheimhaltung und Privatsphäre [Dan+20] oder einen stärkeren Fokus auf Energieverbrauch [FB21] und Batterielebensdauer der Endgeräte [DB18]. Auf der anderen Seite werden Möglichkeiten für

die Weiterentwicklung der in 5G eingeführten Anwendungsprofile diskutiert. Dabei sind besonders Zuverlässigkeit und Latenz auch in 6G weiterhin als wesentliche Leistungskennzahlen im Gespräch [Alw+21; Gio+20; Mah+20; Par+20]. Potenzielle Weiterentwicklungen von 5G-URLLC sind überblicksartig in Abb. 1.1 ergänzt. Aufgrund des frühen Entwicklungsstands bei der 6G-Entwicklung zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit nutzen unterschiedliche Quellen verschiedene Bezeichnungen für diese neuen Anwendungsprofile. Die in dieser Arbeit verwendeten Bezeichnungen können sich daher zu einem späteren Zeitpunkt noch ändern. Unter dem Namen extreme ultrazuverlässige Kommunikation mit niedriger Latenz (engl. *extreme ultra-reliable low-latency communications*, xURLLC) werden in [Mah+20; Par+20] strengere Latenz- und Zuverlässigkeitsanforderungen im Vergleich zu 5G angestrebt. Für industrielle Anwendungen wird in [Mah+20; Par+20] eine zehnfach kleinere Latenzanforderung von 0,1 ms bei einer Zuverlässigkeit von 99,999 999 9 % gefordert. Eine solche Skalierung des URLLC-Profiles ist ebenso in [Alw+21] beschrieben. Die Motivation ist in diesem Fall eine telemedizinische Anwendung, bei welcher eine medizinische Operation durch Fernsteuerung einer robotischen Operationseinheit über große Distanzen durchgeführt wird. Ein gänzlich neues Anwendungsprofil für zukünftige Kommunikationssysteme ergibt sich, wenn die angestrebten Latenz- und Zuverlässigkeitswerte von 5G für eine stark wachsende Zahl an Geräten angeboten werden sollen [Pok+20]. Ein solches Anwendungsprofil ist eine Schnittmenge zwischen den Latenz- und Zuverlässigkeitsanforderungen von URLLC und den Anforderungen der Gerätedichte von mMTC. In [Pok+20] wird ein solches Anwendungsprofil als kritische massive Maschinenkommunikation (engl. *critical massive machine-type communications*, cmMTC) bezeichnet. Solche hohen Gerätedichten ergeben sich sowohl durch einen weiterhin stark steigenden industriellen Einsatz von Funkverbindungen zur Vernetzung von Maschinen, aber auch bei Etablierung von URLLC-Robotikanwendungen für eine große Anzahl an Privatanutzern. Eine weitere Schnittmenge aus zwei 5G-Profilen wird auch für URLLC und eMBB erwartet. Neuartige Anwendungen der virtuellen Realität (engl. *virtual reality*, VR) und Anwendungen der erweiterten Realität (engl. *augmented reality*, AR), weisen neben Anforderungen an eine geringe Übertragungslatenz gleichzeitig hohe Anforderungen an die Datenrate auf [Cho+20]. Für industrielle Anwendungen des 5G-URLLC-Profiles, zum Beispiel bei der kabellosen Fabrikautomation, ergeben sich demgegenüber nur kleine zu übertragende Nutzlasten von wenigen hundert Bytes [Fro+14]. Ein solches Anwendungsprofil als Kombination aus URLLC und eMBB wird in [Cho+20] als Kommunikation mit ultrahoher Datenrate und niedriger Latenz (engl. *ultra-high-speed low-latency communications*, uHSLC) bezeichnet.

Für die Realisierung dieser neuen Anwendungsprofile ergeben sich vielfältige Herausforderungen und großer Bedarf an neuen Technologien. Eine besondere Herausforderung für jedes der vorgestellten 6G-Profile ist die Menge der benötigten Funkressourcen. Zuverlässigkeit bei gleichzeitig geringer Latenz wird in 5G durch Redundanz bei der Datenübertragung realisiert. Bei strengeren Zuverlässigkeitsanforderungen im xURLLC-Anwendungsprofil oder dem gleichzeitigen Erzielen hoher Zuverlässigkeit und Gerätedichte für mMTC oder hoher Zuverlässigkeit und Datenraten im uHSLC-Profil ergibt sich ein mit etablierten Methoden nicht mehr deckbarer Funkressourcenbedarf.

## 1.2 Beitrag der Arbeit

In dieser Arbeit wird eine neue Methode für eine ressourceneffiziente Realisierung hochzuverlässiger Kommunikation vorgeschlagen. Die grundlegende Idee des vorgeschlagenen Verfahrens ist es Informationen über die Funkressourcenqualität für die Realisierung von zuverlässiger Kommunikation mit niedriger Latenz zu verwenden und dadurch die Menge an Redundanz zu reduzieren. Auf der Medienzugriffsschicht können Informationen über die Ressourcenqualität genutzt werden, um eine Auswahl und Verteilung von Funkressourcen durchzuführen. Im Gegensatz zu einem proaktiven Hinzufügen von Redundanz verspricht ein solches Verfahren hohe Zuverlässigkeit bei einem effizientem Ressourcenumgang. Ein besonderer Fokus dieser Arbeit liegt auf dem Erlangen der nötigen Informationen über die Ressourcenqualität. Zum Erlangen dieser Informationen ist das Versenden von Pilotsymbolen nötig, die, ebenso wie Redundanz, zusätzlichen Mehraufwand für das Kommunikationssystem bedeuten. Um die Häufigkeit der Überwachung der Funkressourcen auf ein akzeptables Maß zu begrenzen, werden Vorhersagen für die Funkressourcenqualität genutzt. Die Beiträge dieser Arbeit können wie folgt zusammengefasst werden:

- Kapitel 2 diskutiert den Stand der Technik von hochzuverlässiger Kommunikation mit niedriger Latenz und führt relevante Grundlagen zum Verständnis der Arbeit ein.
- Kapitel 3 analysiert die Anforderungen an Zuverlässigkeit und Datenrate des uHSLC-Anwendungsprofils am Beispiel zukünftiger AR-Anwendungen, bei denen die rechenaufwändige Bildsynthese der AR-Inhalte auf einen Server ausgelagert wird und als Videostream an das Endgerät zurückübertragen wird. Zur Ableitung der Anforderungen wird ein Markov-Modell für die Übertragung von AR-Videostreams mit niedriger Latenz entwickelt. Die Parametrisierung

des Modells erfolgt auf Basis eines Videodatensatzes für verschiedene AR-Anwendungen und Videoauflösungen. Die identifizierten Zuverlässigkeitsanforderungen für die Realisierung von AR im uHSLLC-Profil bilden die Basis für die Diskussionen in den nachfolgenden Kapiteln.

- In Kapitel 4 wird die vorgeschlagene Methode für eine ressourceneffiziente Realisierung des uHSLLC-, xURLLC- und cmMTC-Anwendungsprofils mit hohen Zuverlässigkeitsanforderungen eingeführt. Es erfolgt eine Analyse der erzielbaren Genauigkeit einer Kanalvorhersage zur Identifizierung von Funkressourcen mit ausreichender Qualität für hochzuverlässige Übertragungen. Für die Vorhersage der Funkkanäle wird ein klassischer Wiener-Filter-Ansatz gewählt, welcher für theoretische Rayleigh- und Rice-Kanäle untersucht wird. Durch die Überführung des Problems in ein Klassifizierungsproblem und den Vorschlag geeigneter Leistungskennzahlen kann die Zuverlässigkeit einer auf Vorhersagen basierenden Funkressourcenallokation abgeschätzt werden. Geeignete Arbeitspunkte des Prädiktors werden diskutiert und dessen Grenzen aufgezeigt.
- In Kapitel 5 wird die Leistung einer auf Vorhersagen beruhenden Ressourcenallokation für eine begrenzte Zahl an Funkressourcen untersucht. Ein geeignetes Optimierungsziel wird vorgeschlagen und ein Algorithmus zur Ressourcenallokation wird entwickelt. Für den herausfordernden Rayleigh-Kanal mit häufigen starken Schwankungen der Empfangsleistung werden eine obere und eine untere Schranke für die Zuverlässigkeit nach erfolgter Ressourcenallokation präsentiert.
- In Kapitel 6 wird die Untersuchung aus Kapitel 5 um den Fall erweitert, dass Nutzer durch langsamen Schwund und Pfadverlust in Systemen ohne Sendeleistungsregelung im Mittel Kanäle mit einer unterschiedlichen Qualität beobachten. Eine Abwandlung des Optimierungsziels der Ressourcenallokation und eine adaptive Anpassung der Zahl an Trainingssignalen in Abhängigkeit von der mittleren Kanalqualität werden für diesen Fall empfohlen.
- Kapitel 7 fasst die Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Forschungsfragen hinsichtlich der Realisierung ressourceneffizienter, zuverlässiger Drahtlosechtzeitkommunikation.

