

# Leistungsbewertung von Ressourcenmanagementstrategien für zelluläre und drahtlose Mesh-Netzwerke

Florian Wamser<sup>1</sup>

**Abstract:** Heutige Kommunikationsnetzwerke müssen eine große Anzahl an heterogenen Anwendungen und Diensten schultern. Dies gilt zusätzlich zu den Herausforderungen, dass sie kostengünstig sein sollen und schnelles, qualitativ-hochwertiges Internet anbieten müssen. Ein spezialisiertes Ressourcenmanagement kann in vielen dieser Fälle helfen und eine Win-Win-Situation für beide Parteien - den Benutzer und das Netzwerk - darstellen.

In meiner Dissertation [Wa15] untersuche ich verschiedene neue Ressourcenmanagementansätze zur Leistungsoptimierung und Steigerung der Ressourceneffizienz in Zugangnetzen. Die untersuchten Ansätze arbeiten auf verschiedenen Kommunikationsschichten und erfüllen unterschiedliche Ziele. Am Ende stellt diese Arbeit Empfehlungen für Netzbetreiber dar, wie ein Ressourcenmanagement für unterschiedliche Netzwerktypen und Ziele aussehen kann und welcher Nutzen in Vergleich mit dem erforderlichen Aufwand und der höheren Komplexität zu erwarten ist.

## 1 Motivation

In heutigen Zugangnetzen steigt der Datenverkehr unaufhaltsam an. Viele große Hersteller und Netzwerkoperatoren reden von der *1000x Data Challenge* (zu Deutsch: Steigerung des Datenverkehrs um das Tausendfache). Es gibt immer mehr Applikationen und Anwendungen, resultierend aus dem technischen Fortschritt bei Geräten für den Endverbraucher und dem technologischen Fortschritt im Netzwerk. Gleichzeitig ergeben sich auch immer unterschiedlichere Anwendungsfelder. Zu nennen sind hierbei die aufstrebenden Felder Maschine-zu-Maschine-Kommunikation, Anwendungen aus dem Gesundheitswesen, Ultra-High-Definition-Fernsehen, neue kommerzielle Dienste für das Transportwesen und für Firmen, Assistenzsysteme für ältere Menschen und Sensornetzwerke. Damit entstehen hohe, heterogene Anforderungen an die Zugangnetze.

Aus technischer Sicht der Kommunikationsnetze bedeutet dies, dass nicht nur einzelne Anwendungen im Netzwerk unterstützt werden müssen, sondern dass eine breite Berücksichtigung aller Umstände und Anforderungen nötig ist. Dies gilt zusätzlich zu den üblichen Anforderungen, wie beispielsweise Kosten- und Energieeinsparungen im Netzwerk.

Eine solche umfassende Berücksichtigung aller Eventualitäten kann nur durch ein dynamisches, individuelles und intelligentes Management der Übertragungsressourcen erreicht werden. Dabei muss einerseits die theoretische Kapazität soweit wie möglich ausgenutzt

---

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Kommunikationsnetze (Prof. Dr.-Ing. Phuoc Tran-Gia), Universität Würzburg, [florian.wamser@informatik.uni-wuerzburg.de](mailto:florian.wamser@informatik.uni-wuerzburg.de)

werden und andererseits aber sowohl die System- und Netzarchitektur als auch das Nutzer- und Applikationsverhalten angemessen in Betracht gezogen werden. Hierfür ist ein vielschichtiges Ressourcenmanagement auf verschiedenen Ebenen nötig.

Das Ziel der Doktorarbeit ist die Entwicklung, Untersuchung und Bewertung von einem ganzheitlichen Ressourcenmanagement im Hinblick auf neue Anforderungen und aufkommende, neue Anwendungsfelder. Es werden entsprechende Ansätze auf verschiedenen Kommunikationsebenen mit sowohl Simulationsstudien als auch praktischer Emulationen und Messungen in Testbeds entwickelt. Die untersuchten und entwickelten Ansätze unterscheiden sich hinsichtlich der Komplexität und der Ebene auf der sie arbeiten mit dem Ziel, den gesamten Gestaltungsraum auf systematische Art und Weise abzudecken. Da die Ansätze in der Regel nicht allgemein gültig für alle Arten von Zugangsnetzen evaluiert werden können, sind in der Arbeit Implementierungsbeispiele enthalten. Zusätzlich werden technologiespezifische Bewertungen neben der Modellierung des Szenarios und der Applikationsanforderungen durchgeführt. Es werden Mobilfunknetze und drahtlose Mesh-Zugangsnetzwerke in dieser Arbeit betrachtet.

## **2 Teil 1: Untersuchungen zum Ressourcenmanagement auf der physikalischen Ebene**

Der erste Teil beschäftigt sich mit dem Management von Ressourcen auf der physikalischen Übertragungsebene. Es werden verteilte Ressourcenallokationsansätze unter verschiedenen Einstellungen für Mobilfunknetze untersucht. Aufgrund der ambitionierten Leistungsziele der Netzwerkoperatoren, werden in Mobilfunknetzen Übertragungsressourcen sehr oft wiederverwendet. Dies führt zu potentieller Interferenz zwischen Mobilfunkzellen, die auf den gleichen Frequenzen senden. Der Schwerpunkt der Arbeit im ersten Teil liegt auf der Identifizierung von Ansätzen, die in der Lage sind, solche Störungen zu reduzieren. Es werden verschiedene Koordinierungsmechanismen entwickelt und vorgeschlagen, die zu einer effizienteren Ressourcennutzung führen. Weiterhin werden neue Möglichkeiten zum Partitionieren und/oder Einschränken die verschiedenen Übertragungsressourcen (Zeit, Frequenz, Ort) im Hinblick auf die unterstützte Anzahl von Benutzern im Netzwerk ausgewertet und mit der Leistung von konventionellen Schemata verglichen. Diese Auswertungen werden für Benutzer mit konstanten Verkehrsaufkommen durchgeführt. Ein weiteres zusätzliches Ziel ist es ferner, die verschiedenen Ansätze in Bezug auf verschiedene, neue Verkehrsmuster zu untersuchen, wie etwa nicht-saturierter Verkehr im Uplink. Der heutige Verkehr im Uplink besteht oftmals aus kleinen Bursts durch wiederholende TCP-Acknowledgements, HTTP-Anfragen oder konstantem Signalisierungsverkehr. Dazu wird ein neuer Ressourcenzuweisungsalgorithmus vorgeschlagen, der auf der intelligenten Wahl eines Modulations- und Kodierungsschemas für einen nicht-saturierten Uplink basiert. Alle Ansätze werden modelliert und detailliert mit umfangreichen Simulationen ausgewertet.

## 2.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zunächst wird der Einfluss verschiedener Partitionierungsstrategien und Beschränkungen der Übertragungsressourcen evaluiert. Eines der Ziele ist, die verschiedenen Ansätze in Bezug auf aktuelle Verkehrsmuster, wie beispielsweise nicht-saturierender Verkehr im Uplink, zu bewerten. Zu diesem Zweck wird der Uplink untersucht, welcher heute typischerweise im Mobilfunk aus TCP-Bestätigungen oder kurzen HTML-Anfragen besteht. Infolgedessen wird kein Szenario mit ausgelasteten Übertragungswarteschlangen untersucht, sondern ein realistisches Uplink-Szenario bei nicht gesättigter Verkehrssituation. Darüber hinaus werden dezentrale Ansätze untersucht, die keine Signalisierung erfordern. Neue Kombinationen werden mit herkömmlichen Systemen verglichen, die keine Beschränkung oder Ressourcenaufteilung wie das gängige Frequency Reuse 1 verwenden.

Es hat sich gezeigt, dass

1. eine Ordnungsmetrik (koordinierte Benutzerzuweisung) für die Leistung des gesamten Mobilkommunikationssystems kritisch ist. Diese Metrik legt eine Reihenfolge fest, nach der die Benutzer auf die Übertragungsressourcen zugewiesen werden. Dies gilt sowohl für volle Frequenzwiederverwendung sowie für Fractional Frequency Reuse-Ressourcenpartitionierung.
2. Teilfrequenzwiederverwendungsschemata wie Soft Frequency Reuse (SFR) in Verbindung mit einer Benutzerordnungsmetrik eine Leistungssteigerung ermöglichen.
3. bei SFR-Ressourcenzuteilung die Art der Einschränkung der Übertragungsressourcen die Leistung der Benutzerallokation erheblich beeinflusst.
4. die Koordinierung in Bezug auf Benutzergruppen (aggregierte Koordination) kaum wirksam ist im Vergleich zu der Betrachtung der einzelnen Nutzer. Dies liegt an der Tatsache, dass eine Begrenzung der Gesamtsendeleistung für eine Gruppe, es einem einzelnen Benutzer erlaubt eine signifikant hohe Sendeleistung zu verwenden, was in viele Fällen zu Störungen (Interferenzen) führt.
5. für SFR gilt: eine koordinierte Benutzerzuweisung im Hinblick auf Interferenzen zwischen Zellen erlaubt eine höhere Leistungssteigerung als die unterschiedliche Behandlung von einzelnen Benutzern, wie in den verschiedenen Arten von SFR spezifiziert.
6. auch für die Zuweisung zu den Seitenbändern (Frequenzbänder, die vorrangig zu anderen Nachbarzellen oder Sektoren gehören) ergibt sich eine Leistungssteigerung bei der Verwendung einer Ordnungsmetrik. Der Effekt ist jedoch weniger vorteilhaft im Vergleich zur Verwendung von Ressourcenbeschränkung.
7. der optimale Beschränkungsfaktor von SFR abhängig ist von der Last im Netzwerk.

Weiterhin wird der Einfluss der Antennenkonfiguration auf SFR, Frequency Reuse 1 (volle Frequenzwiederholung) und Frequency Reuse 3 (Frequenzpartitionierung) untersucht. Erweiterte Interferenzvermeidungsansätze setzen eine angemessene Antennenkonfiguration

voraus. Solch eine Konfiguration hat den Zweck, einerseits eine ausreichende Zellabdeckung zu gewährleisten; andererseits soll sie eine gute Zellisolierung gegenüber Störungen zwischen Zellen erreichen.

Es hat sich gezeigt, dass

1. die Antenneneinstellung (Abwärtsneigung) signifikant die Leistung von SFR beeinflusst. Sie ist abhängig von der Zellgröße und der aktuellen Last.
2. aufgrund von Pfadverlust, Mehrwegeausbreitung und Antennenkonfiguration eine unterschiedliche Behandlung der Benutzer nach der geographischen Lage innerhalb der Zelle für partielle Frequenzwiederholung nicht sinnvoll ist. Vielmehr ist es günstiger die erfahrene Interferenz von Benutzern abhängig von der Signalstärke als Metrik zu benutzen.

Die Antennenkonfiguration beeinflusst die Signalausbreitung innerhalb der Mobilfunkzelle. Somit kann bei einer angepassten Einstellung die Interferenz verringert werden. Folglich kann die Verminderung der Störung als weniger wichtig in einem solchen Fall betrachtet werden. In der Arbeit werden verschiedene Antennenkonfigurationen getestet. Für eine feste Zellengröße wurden vertikale Einstellungswerte bestimmt, bei denen die Ressourcenzuteilung am effizientesten funktioniert.

Die elektrische Abwärtsneigung zeigte die besten Ergebnisse für alle Ressourcenallokationsstrategien und untersuchten Neigungswinkeln. Bei voller Frequenzwiederverwendung (Frequency Reuse 1) wird die Zellisolierung ab einer bestimmten Last in der Zelle wichtiger als die Vermeidung von Interferenzen. Insgesamt werden mit SFR bessere Ergebnisse erzielt, da die Abdeckung besser ausgenutzt und die Interferenz bereits durch das SFR-Schema gemildert wird.

Weiterhin wird in der Arbeit zudem ein neuer Ressourcenzuweisungsalgorithmus vorgeschlagen, der auf der Grundlage einer intelligenten Auswahl eines Modulations- und Kodierungsschemas für einen nicht gesättigten Uplink basiert. Aufbauend auf den vorhergehenden Ergebnissen wird ein Schema entwickelt, das a) weniger lastabhängig ist und folglich nicht dynamisch angepasst werden muss, b) Interferenzen reduziert, und c) Frequenzpartitionierung verwendet.

Im Zuge dessen hat sich gezeigt, dass es eine nicht-lineare Beziehung zwischen Sendeleistung und dem gewählten Modulations- und Kodierungsschema für die gleiche Menge an Daten gibt. Zum Beispiel benötigt eine Übertragung mit Modulation QPSK-1/2 etwa 4,5 Ressourceneinheiten mehr gegenüber einer Modulation mit QAM64-3/4. Die akkumulierte Übertragungsleistung mit QPSK ist jedoch etwa 15 dB niedriger als bei QAM64-3/4 bei der gleichen Menge an übertragenen Daten. Daher ergibt sich durch ein geringes Modulationsschema eine signifikante Einsparung an Sendeleistung. Als Ergebnis wird ein Leistungsgewinn aufgrund der geringeren Interferenzen zwischen Zellen erreicht.

Der vorgeschlagene Algorithmus nutzt diese Feststellung. Wenn Übertragungsressourcen in einem Rahmen nicht verwendet werden, wählt er eine robustere Modulation und Kodierung für die Benutzer, um Störungen zwischen Zellen zu verringern. Dies ist besonders

interessant im Uplink mit nicht saturiertem Kanal, weil hier einige freie Ressourcen genutzt werden können.

Es hat sich ergeben, dass

1. niedrigere Modulations- und Kodierungsschemata genutzt werden können, um Störungen zwischen Zellen zu verringern.
2. wenn Ressourcen in einer Zelle und in dem entsprechenden Übertragungsrahmen nicht verwendet werden, die Modulations- und Kodierungsschemata abgesenkt werden können, um vollständig die Ressourcen zu nutzen. Obwohl mehr Ressourcen verwendet werden, wird die Inter-Zell-Interferenz reduziert.
3. dieser Ansatz deutlich weniger lastabhängig ist als reines SFR.

### **3 Teil 2: Spezifikation und Entwicklung von anwendungsorientiertem Ressourcenmanagement**

Aufgrund der unterschiedlichen Anwendungen und Dienste, werden die Netze zunehmend mit heterogenen, anwendungsspezifischen Anforderungen von Applikationen konfrontiert. Dem entsprechend liegt der Schwerpunkt im zweiten Teil auf der Optimierung der Netzwerkcharakteristiken und -parameter unter Berücksichtigung von Anwendungen und deren Bedürfnissen. Es wird anwendungsbezogenes Ressourcenmanagement eingeführt und spezifiziert, um effiziente und maßgeschneiderte Zugangsnetze zu ermöglichen. Dazu verwendet das Ressourcenmanagement Informationen über den Status einer Anwendung (zB. aktiv/inaktiv, Anzeigen eines Video, Pufferfüllstand einer Anwendung, Applikationstyp: zB. Chat, Zustand der Applikation, Interaktion mit Benutzer), und integriert diese Daten in das Netzwerk-Ressourcenmanagement. Basierend auf entsprechender Literatur werden Anwendungsinformationen genutzt, die die wahrgenommene Qualität beim Benutzer (Quality of Experience, QoE) in hohem Maße widerspiegeln. Ein integraler Bestandteil dieses Ressourcenmanagements ist das Bestimmen und Messen der nötigen Informationen der Anwendungen. Die Leistung des Ressourcenmanagements hängt stark von diesem Vorgang ab. Um die entsprechenden Informationen überwachen zu können, wird in der Arbeit ein dynamischer Ansatz vorgestellt und im dritten Kapitel am Beispiel von YouTube-Video-Streaming implementiert und bewertet.

#### **3.1 Zusammenfassung der Ergebnisse**

In der Arbeit wird anwendungsbezogenes Ressourcenmanagement eingeführt, um effiziente und angepasste Zugangsnetze zu ermöglichen. Der Fokus liegt sowohl auf der Beschreibung des Ansatzes als auch auf der Definition der nötigen Komponenten. Eigenständige Nutzungsszenarien werden definiert und evaluiert für verschiedene Arten von Zugangsnetzen.

Weiterhin wird in diesem Teil der Arbeit die Implementierung und Bewertung eines passenden Applikationsmonitoring präsentiert. Monitoring zu diesem Zweck ist derzeit noch nicht ausreichend in der Literatur behandelt worden.

Es wurde gezeigt, dass

1. Netzwerkprobleme einen hohen negativen Einfluss auf die erfahrene Dienstgüte (Quality of Experience) beim Nutzer haben können.
2. durch QoE-Modellierung mögliche Stellschrauben für Ressourcenmanagementalgorithmen identifiziert werden können.

Der vorgeschlagene Ressourcenmanagementansatz ist anwendungsbezogenes Ressourcenmanagement. Es werden Informationen über den Status einer Applikation genutzt (Applikationsinformationen). Eine Applikation kann beispielsweise aktiv oder ruhend sein. Sie kann ein Video abspielen oder Informationen anzeigen. Applikationsinformationen spiegeln die QoE eines Nutzers zu einem hohen Grad wieder, wenn sie richtig und anwendungsspezifisch ausgewählt werden.

Es hat sich gezeigt, dass

1. die Integration von Anwendungsinformationen helfen kann zu entscheiden, welche Ressourcenmanagementaktionen durchgeführt werden sollten.
2. Ressourcenmanagement unter Berücksichtigung des Applikationszustands ein dynamisches Monitoring der Applikation erfordert.
3. neben dem Monitoring, die folgenden anderen Komponenten für anwendungsorientiertes Ressourcenmanagement nötig sind: Ressourcenmanagementaktion, Netzwerkmonitoring, Entscheidungseinheit, das die Informationen über Netzwerk und Applikation empfängt und verarbeitet.

Die Leistung von anwendungsorientiertem Ressourcenmanagement ist abhängig von den genutzten Informationen. Zu diesem Zweck wird ein dynamisches Monitoring am Beispiel YouTube Video Streaming entwickelt und bewertet. Es besteht aus einem optionalen Web Browser-Plugin, das den Zustand der Applikation erkennt, und einer Netzwerkkomponente. Insbesondere erkennt das Plugin den aktuellen Abspielzeitpunkt des Videos. Die Netzwerkkomponente untersucht den Datenverkehr im Netzwerk und detektiert Adobe Flash Videos. Es extrahiert die Video-Metadaten und schätzt so den aktuellen Videopufferfüllstand am Client.

Es ergibt sich ein Trade-off zwischen Komplexität und Genauigkeit. Wenn das optionale Plugin genutzt wird ist der Eingriff auf der Client-Seite nötig. Wenn das Plugin nicht genutzt wird, kann mit der Komponente im Netzwerk die fehlenden Informationen geschätzt werden. Die Netzwerkkomponente wird typischerweise an einem Netzelement installiert, das zentral agiert und Datenverkehr weiterleitet. Wenn beide Teile zusammen genutzt werden, kann der Pufferfüllstand mit hoher Genauigkeit geschätzt werden.

Der aktuelle Videodaten-Pufferfüllstand am Client korreliert direkt mit der Gefahr für ein Video-Stocken (auch Stalling oder Buffering genannt). Nach aktuellen Arbeiten [Ho11, Do11] ist das Video-Stocken der dominierende Faktor für eine QoE-Verschlechterung. Bei Video-Clips ist dies wichtiger als die angezeigte Video-Auflösung, was das zweitwichtigste Kriterium ist.

Es wurde gezeigt, dass

1. das vorgeschlagene Monitoring den Zeitpunkt, wann ein Video zu stocken beginnt, schätzen kann.
2. das Monitoring als kleines Plugin-Programm implementiert werden kann, während es wertvolle Informationen für einen Netzwerkoperator liefert. Falls es genutzt wird, können beide Parteien davon profitieren, da der Operator Informationen über die Nutzerzufriedenheit sammeln und für den Benutzer das Netzwerk optimieren kann.

#### **4 Teil 3: Anwendungsbeispiele, Emulation, Messung und Leistungsanalyse von anwendungsbezogenem Ressourcenmanagement für drahtlose Mesh-Zugangsnetzwerke und zelluläre Mobilfunknetze**

Man kann Ressourcenmanagementansätze und -algorithmen nicht allgemein gültig für alle Arten von Zugangsnetzen untersuchen. Je nach Netzwerktyp und -technologie ergeben sich unterschiedliche Netzwerkeigenschaften, die ein Ressourcenmanagement ausnutzen kann oder berücksichtigen muss. In der Arbeit werden Anwendungsbeispiele von applikationsbezogenem Ressourcenmanagement gegeben. Zum einen werden drahtlose Multi-Hop Mesh-Netzwerke betrachtet. Mesh-Netzwerke bieten viele verschiedene Optionen und Managementmöglichkeiten bei der Übertragung von Daten. Somit stellt ein solches Netz eine ausgezeichnete Gelegenheit dar, die Vorteile von anwendungsbezogenem Ressourcenmanagement zu quantifizieren. Die Bewertung erfolgt in einem Mesh-Testbed mit empirischen Messungen anhand von YouTube. Diese praktische Implementierung veranschaulicht die Vorteile des Konzepts, zeigt die Machbarkeit und quantifiziert den Nutzen für YouTube.

Ein weiterer Typ von Netzwerk, das untersucht wird, ist das Mobilfunknetz. Im letzten Teil der Arbeit wird anwendungsorientiertes Ressourcenmanagement für die Luftschnittstelle im Mobilfunk zwischen Teilnehmergerät und der Basisstation spezifiziert und bewertet. Insbesondere durch den kostenintensiven Wettbewerb unter den verschiedenen Betreibern ist der Einsatz eines solchen Ressourcenmanagements sinnvoll, da er eine effizientere Ressourcennutzung ergibt. Dies bestätigen die simulativen Ergebnisse in weiten Teilen.

## 4.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zunächst wird die Tauglichkeit von Ressourcenmanagementkonzepten für drahtlose Mesh-Netzwerken bewertet. Dies wurde am Beispiel von YouTube Video Streaming durchgeführt. Im Anschluss wird der Einfluss auf die QoE quantifiziert, wenn Applikationsinformationen beim Scheduling in Downlink-Richtung in der Mobilfunkbasisstation genutzt werden.

Insbesondere werden verschiedene Applikationen oder Tätigkeiten im Internet wie Web Browsing, Dateidownloads, progressives Video-Streaming und Skype Video Conferencing betrachtet. Im Fokus ist die Quantifizierung der Vorteile spezifisch für verschiedene Applikationen.

Die Bewertung von drahtlosen Mesh-Netzwerken wurde in einem Testbed durchgeführt. Die nötigen anwendungsorientierten Komponenten wurden implementiert und in das Netzwerk integriert. Es werden in der Dissertation detaillierte Implementierungsdetails von der vorhandenen Realisierung beschrieben.

Es wurde gezeigt, dass

1. ein anwendungsorientiertes Ressourcenmanagement sowohl die Ressourcenauslastung als auch die erfahrene Nutzerqualität verbessern kann. Dies gilt für drahtlose Mesh-Netzwerke als auch für zelluläre Mobilfunknetze im gezeigten Anwendungsfall.
2. mehr YouTube-Nutzer im Zugangszugnetzwerk unterstützt werden können durch die effizientere Ausnutzung der Übertragungsressourcen mit anwendungsbezogenem Ressourcenmanagement.
3. die Last verteilt werden kann auf verschiedene Internet-Gateways eines Mesh-Netzwerks.
4. eine dynamische Priorisierung von IP-Flüssen die QoE von YouTube-Nutzern signifikant verbessern kann durch die Berücksichtigung des aktuellen Pufferfüllstands des Nutzers.
5. auch auf Anwendungsseite ein Ressourcenmanagement durchgeführt werden kann, das die Videoauflösung der Anwendung adaptiert. Der Unterschied zu aktuellen adaptiven Video-Streaming-Lösungen ist, dass in diesem Fall die Entscheidung durch das Netzwerk gesteuert wird. Eine niedrigere Videoauflösung resultiert in einer niedrigeren Downloadbandbreite mit geringer Verschlechterung der Nutzerzufriedenheit. Folglich kann durch die clientseitige Adaption die Nutzerzufriedenheit kontrolliert werden, wenn nicht genügend Ressourcen zur Verfügung stehen.
6. der beste Trade-Off zwischen QoE und Ressourceneffizienz erreicht werden kann, wenn ein kombinierter Ansatz verwendet wird. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Strategie aus einem Zusammenspiel von clientseitiger und netzwerkseitiger Adaption hilft, eine hohe QoE zu etablieren und Ausgaben zu sparen.

Die Untersuchungen in einem zellulären Zugangsnetz wurde mit Hilfe einer simulativen Analyse durchgeführt. Es wurde ein 3GPP LTE Simulator auf Systemebene entworfen und in Verbindung mit einem detaillierten Modell für verschiedene Applikationen, einem TCP-Protokoll-Modell und verschiedenen Übertragungskanalmodellen implementiert. Zunächst wird ein Schedulingalgorithmus vorgeschlagen, der dynamisch Nutzer bevorzugt, falls eine QoE-Beeinträchtigung bevorsteht. Die Priorisierung wird proaktiv nach dem aktuellen Pufferfüllstand des Video Players durchgeführt. Am Schluss wird eine statistische Studie durchgeführt. Der Nutzen von anwendungsbezogenem Ressourcenmanagement, das den Anwendungsstatus für verschiedene Applikationen einbezieht, wird betrachtet.

Für zelluläre Mobilfunknetze gilt, dass

1. der Schedulingprozess aufgrund von aktuellen Anforderungen vom Client angepasst werden kann, um eine QoE-Verbesserung für den Endbenutzer zu erreichen, falls insgesamt in der Zelle genügend Ressourcen zur Verfügung stehen.
2. für ein YouTube-Video das Video-Stocken auf Kosten der Download-Zeit anderer Nutzer verhindert werden kann, die Web Browsing benutzen oder Dateien aus dem Internet herunterladen. Gerade für lange Downloads wird dadurch die Gesamt-QoE verbessert, da eine Verlängerung der Downloadzeit bei langen Downloads zu einem gewissen Maße durch den Nutzer toleriert wird [Do11].
3. ein flexibles Scheduling definiert werden kann, das den Pufferfüllstand eines Client-Videos berücksichtigt. Dies kann benutzt werden, um Nutzer-Diversität (multi user diversity) auszunutzen. Jedoch wird das Signalisieren des Pufferstatus vom Client zur Basisstation benötigt. Weitere Herausforderungen sind die Skalierbarkeit des Ansatzes, d.h. der Umgang mit vielen Nutzern, die zur gleichen Zeit Videos schauen.
4. eine Verbesserung der gesamten erfahrenen Nutzerqualität zu erwarten ist, falls anwendungsbezogenes Scheduling für die betrachteten Szenarios mit verschiedenen Applikationen und Diensten genutzt wird.

Die Resultate quantifizieren den Trade-Off zwischen der Komplexität für die Bereitstellung von Anwendungsinformationen im Netzwerk und dem Gewinn im Hinblick auf die QoE des Nutzers.

## Literaturverzeichnis

- [Do11] Dobrian, Florin; Sekar, Vyas; Awan, Asad; Stoica, Ion; Joseph, Dilip; Ganjam, Aditya; Zhan, Jibin; Zhang, Hui: Understanding the impact of video quality on user engagement. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 41(4):362–373, 2011.
- [Ho11] Hoßfeld, Tobias; Seufert, Michael; Hirth, Matthias; Zinner, Thomas; Tran-Gia, Phuoc; Schatz, Raimund: Quantification of YouTube QoE via crowdsourcing. In: Multimedia (ISM), 2011 IEEE International Symposium on. IEEE, S. 494–499, 2011.
- [Wa15] Wamser, Florian: Performance Assessment of Resource Management Strategies for Cellular and Wireless Mesh Networks. Dissertation, 2015.



**Florian Wamser** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze an der Universität Würzburg. Er studierte an der Universität Würzburg und an der Helsinki University of Technology, Finnland. Sein Diplom in Informatik erhielt er im Jahr 2009. Während der Diplomarbeit arbeitete er an den Themen Charakterisierung und Modellierung von Anwendungsverkehrsströmen in drahtlosen Breitband-Zugangsnetzen. Im Jahr 2015 erhielt er den akademischen Grad „Doktor der Naturwissenschaften“ (Dr. rer. nat.). Der Titel seiner Dissertation ist Leistungsbewertung von Ressourcenmanagementstrategien für zelluläre und drahtlose Mesh-Netzwerke.

Sein aktueller Forschungsschwerpunkt liegt auf der analytischen und simulativen Leistungsbewertung und Optimierung von Cloud-Netzwerken und verwandten Bereichen.