



# Abschlussbericht zum Vorhaben: Fundamente der Netzinformationstheorie

Zuwendungsempfänger:  
Technische Universität Berlin

Förderkennzeichen:  
01BU0920

Laufzeit des Vorhabens:  
01.10.2009-30.09.2012 (verlängert bis 31.03.2013)

Projektleiter:  
Dr.-Ing.habil. Slawomir Stanczak  
Prof. Dr.-Ing. Dr.rer.nat. Holger Boche

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Zusammenfassende Angaben</b>	<b>3</b>
1.1 Aufgabenstellung . . . . .	3
1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde . . . . .	4
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens . . . . .	5
1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde . . . . .	6
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen . . . . .	6
<b>2 Eingehende Darstellung der Ergebnisse</b>	<b>8</b>
2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele . . . . .	8
2.2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises . . . . .	40
2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit . . . . .	41
2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertung . . . . .	41
2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen . . . . .	43
2.6 Veröffentlichungen . . . . .	44

# 1 Zusammenfassende Angaben

## 1.1 Aufgabenstellung

Die Hauptaufgabe im Forschungsprojekt “Fundamente der Netzinformationstheorie” (Fund-Net) war die Untersuchung und Entwicklung von Algorithmen und Protokollen für zellulare Netzinfrastrukturen, die um ein relativ dichtes Netz von einfachen drahtlosen Kommunikationsgeräten, den sogenannten Mini-Basisstationen (Mini-BS), erweitert werden. Die Mini-BS haben die Aufgabe, ein (kooperatives) autonomes Relais-System für die Überbrückung größerer Entfernungen zu bilden. Ein qualitatives Beispiel der Netzarchitektur ist in Abbildung 1.1 dargestellt.

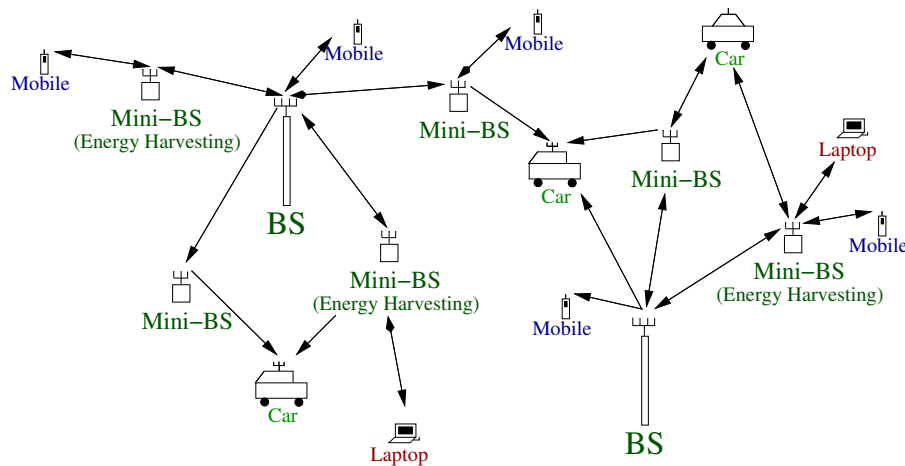


Abbildung 1.1: Die Mini-BS erweitern ein zellulares Netz, indem sie die Signale von und zu weit entfernten Teilnehmern als Relais verstärken und weiterleiten. Dadurch könnten höhere Bitraten erreichbar sein als in rein zellularen Netzen. Die Kenngröße “Datenrate pro Kosten” würde sich deutlich verbessern, da sich die Investitionen in die Infrastruktur im Vergleich zu rein zellularen Netzen reduzieren.

Das Ziel des Projektes war die Entwicklung und Optimierung von Schlüsselkomponenten der Netzinformationstheorie, auf denen die Informationstechnologie für zellulare Mobilfunknetze mit kostengünstiger Relais-Infrastruktur aufbauen wird. Diese Komponenten sind:

1. Ratenlose Kodierung,

2. Netz-Kodierung und physikalische Netz-Kodierung,
3. Kooperierende Weitergabe, kooperative Diversität,
4. Ressourcenallokation und Interferenzmanagement,
5. Multicast-Kommunikation,
6. Fortgeschrittene Mehrantennen-Techniken,
7. Feedback-Kanal, Seiteninformation,
8. Informationstheoretische Sicherheit.

Der wesentliche Beitrag des Projektes soll eine informationstheoretisch fundiertes Rahmenwerk, bestehend aus Performanzgrenzen, modernen Kodierungsverfahren und neuartigen Übertragungsstrategien, für eine kostengünstige Netzarchitektur, die ein großes Potenzial hat, die Leistungsfähigkeit der heutigen zellularen Mobilfunknetze zu wirtschaftlich vertretbaren Kosten entscheidend zu steigern.

## **1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Das Projekt wurde in einer engen Kooperation mit dem Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut (FhG-HHI) durchgeführt, wo Herr Dr. Stanczak eine Forschungsgruppe in der Abteilung Wireless Communications and Networks leitet (neben seiner Tätigkeit als Leiter des Fachgebiets für Informationstheorie und theoretische Informationstechnik an der Technischen Universität Berlin). Die beiden Forschungsgruppen sind stark miteinander verzahnt und es findet ein reger wissenschaftlicher Austausch statt. Die Verzahnung ermöglichte vor allem einen direkten Zugang zu verschiedenen Industriepartnern aus der Mobilfunkbranche sowie zu anderen Forschungsaktivitäten mit praktischen Aspekten der aktuellen Forschung in den projektrelevanten Themen. Diese Möglichkeit wurde und wird auch in Zukunft intensiv genutzt, um die Industrie auf die im FundNet-Projekt entwickelten theoretischen Methoden und Ansätze aufmerksam zu machen und somit die Projektergebnisse zur Industrie zu transferieren. Mehr Informationen über die erfolgten und geplanten Nutzung und Verwertung der Projektergebnisse findet der Leser in Abschnitt 2.4.

Das Projekt wurde auch in einer engen Kooperation mit dem Lehrstuhl für Theoretische Informationstechnik an der Technischen Universität München (Lehrstuhlinhaber seit 2010 Prof. Dr. Dr. Holger Boche) durchgeführt. Beide Institutionen haben ihre spezifischen Erfahrungen, Fachwissen und Kompetenzen in das Projekt eingebracht. Seit seinem Wechsel an die TU München in 2010 beschäftigt sich Herr Prof. Boche verstärkt mit der Entwicklung von Verfahren zur Erhöhung der Sicherheit von Funksystemen basierend auf Erkenntnissen der fundamentalen Sicherheitslimits auf der Physikalischen Schicht (im Sinne der informationstheoretischen Sicherheit / information-theoretic secrecy) unter Berücksichtigung der Netzwerksicherheit. Die Abhörsicherheit war eins der zentralen Themen im FundNet-Projekt.

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Projekt war in insgesamt 9 Arbeitspakete (AP) gegliedert.

**AP1:** Modellbildung und Stand der Technik

**AP2:** Performanzgrenzen

**AP3:** Relaying und Kooperative Diversität

**AP4:** Ressourcenallokation und Interferenzmanagement

**AP5:** Multicast

**AP6:** Netz-Kodierung

**AP7:** Ratenlose Kodierung

**AP8:** Informationssicherheit

**AP9:** Auswertung

Arbeitspaket	1. Jahr	2. Jahr	3. Jahr
<b>AP1: Modellbildung und Stand der Technik</b>			
<b>AP2: Performanzgrenzen</b>			
<b>AP3: Relaying und Kooperative Diversität</b>			
<b>AP4: Ressourcenallokation / Interferenzmanagem.</b>			
<b>AP5: Multicast</b>			
<b>AP6: Netz-Kodierung</b>			
<b>AP7: Ratenlose Kodierung</b>			
<b>AP8: Informationssicherheit</b>			
<b>AP9: Auswertung</b>			

Abbildung 1.2: Zeitlicher Ablauf des Projektes

Der Zeitplan der ursprünglichen Planung ist in Abbildung 1.3 dargestellt. Aufgrund von Verzögerungen bei Stellenbesetzung sind einige Abweichungen vom ursprünglichen Arbeitsplan entstanden. Unmittelbar nach dem Ausscheiden von Prof. Holger Boche, der die TU-Berlin im Herbst 2010 aufgrund seiner Berufung an die TU-München verlassen

hat, sind ernsthafte Personalengpässe entstanden, weil die meisten Lehrstuhlmitarbeiter zusammen mit Herrn Prof. Boche an die TU-München gewechselt sind; darüber hinaus verließen auch einige FhG-MCI-Mitarbeiter das Institut, das von Herrn Prof. Boche geleitet wurde und mit dem Lehrstuhl sehr eng kooperierte. Als Folge wurden viele Stellen in verschiedenen Projekten vakant, die zuerst mit neuen Mitarbeitern besetzt werden mussten. Es wurde daher eine kostenneutrale Projektverlängerung beantragt und dem Antrag wurde entsprochen. Das Projekt wurde um 6 Monate bis zum 31.03.2013 verlängert.

Im Laufe des Projekts gab es regelmäßige Treffen zwischen der TU Berlin, der TU München und dem Fraunhofer HHI.

## **1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde**

Den Ausgangspunkt dieses Projektes bildete die existierende zellulare Netzinfrastruktur, die um ein relativ dichtes Netz von einfachen drahtlosen Kommunikationsgeräten, den sogenannten Mini-Basisstationen (Mini-BS), erweitert wurde. Im Gegensatz zu Basisstationen (BS) sind diese Mini-BS klein, haben stark beschränkte Sendeleistungen und verursachen nur wenig Betriebs- und Wartungskosten; sie verfügen über keinen Zugang zum Festnetz und sind auch untereinander nicht verkabelt.

Der Grundgedanke des im Projekt verfolgten Ansatzes ist denkbar einfach: Die Mini-BS erweitern ein zelluläres Netz, indem sie die Signale von und zu weit entfernten Mobilstationen (MS) als Relais verstärken und weiterleiten. Dadurch könnten höhere Bitraten erreichbar sein als in rein zellularen Netzen. Die Kenngröße "Datenrate pro Kosten" würde sich deutlich verbessern, da sich die Investitionen für Infrastruktur im Vergleich zu rein zellularen Netzen reduzieren. Ist diese Idee aber sinnvoll und machbar? Wenn ja, welche Technologien und Strategien können ein solches Netz ermöglichen und die strengen Anforderungen künftiger Anwendungen wirtschaftlich erfüllen? In diesem Projekt wurden einige der mit diesen Fragen aufgeworfenen Themenkomplexe bearbeitet.

## **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Durch das Projekt und die im Projekt gesetzten Themenschwerpunkte konnten neue wissenschaftliche und industrielle Kontakte geknüpft werden, die neben Kooperationen auch zu gemeinsamen Projekten und Publikationen geführt haben. Zu erwähnen in diesem Zusammenhang ist neben der Kooperation mit der TU München und dem Fraunhofer HHI (vgl. 1.2) vor allem die Zusammenarbeit der Firma BMW Forschung und Technik GmbH in München, die zur BMW Group gehört, einem weltweit operierenden Autohersteller. Die Kooperation kam zustande durch die im FundNet-Projekt entwickelten Verfahren zur Unterstützung der Mobilität in dichten Mobilfunknetzen; die Verfahren basieren auf der Nutzung ratenloser Codierung (einer der zentralen Konzepte im FundNet-Projekt) zur Verbesserung der Handover-Performanz und zur Bildung der so genannten virtuellen Zellen in künftigen Mobilfunknetzen fünfter Generation. Dr. Stanczak betreut zurzeit

zwei Promotionsstudenten, die bei der Firma BMW eingestellt sind und mehrmals im Laufe des Projektes an die TU Berlin zum Besuch kamen.

Schließlich soll es an dieser Stelle nicht unerwähnt bleiben, dass die im FundNet-Projekt erzielten Ergebnisse zu weiteren neuen Kooperationen geführt haben, die im Rahmen von anderen Aktivitäten wie beispielsweise das METIS-Projekt (<https://www.metis2020.com/>) fortgesetzt werden. Mehr Informationen darüber findet der Leser in Abschnitt 2.4.

## 2 Eingehende Darstellung der Ergebnisse

### 2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

#### AP1: Modellbildung und Stand der Technik

**Ziele:** In diesem Arbeitspaket wurde der gegenwärtige Stand der Technik analysiert und aufbereitet. Außerdem, wurde eine grobe Modellbildung und Modellbeschreibung erarbeitet.

Die Arbeiten zum Thema Stand der Technik wurden weitestgehend in den Jahren 2009 und 2010 abgeschlossen. Einen wesentlichen Anteil der bisherigen Arbeiten, umfasste die Aufarbeitung des Standes der Technik von

- ratenloser Kodierung
- Netzkodierung
- Multicast-Kommunikation
- informationstheoretischer Sicherheit.

Das Projektszenario kann im Fall einer Basisstation wie in Abb. 2.1. modelliert werden. Ferner wurden Modelle für unterschiedliche Aspekte des Systems betrachtet, darunter:

- Kanalmodelle für die Multicast-Übertragung mit potenziellem Einsatz von ratenlosen Codes. Dabei handelt es sich sowohl um die Modelle für die physikalische Schicht unter Berücksichtigung mehrerer Antennen, als auch um die Modelle für die Netzwerk-/Anwendungsschicht, bei der die gesamte Übertragungsstrecke als ein Auslöschungskanal (eng. erasure channel) betrachtet werden kann. Es wurde auch der Zusammenhang zwischen den beiden Ansätzen analysiert.
- Abbildung des Protokollstapels im LTE- und WiMAX-Standard. Es wurde Uplink und Downlink berücksichtigt. Das Ziel war das Bereitstellen brauchbarer Modelle mit praktikabler Komplexität und die Erkennung von Freiheitsgraden im System, im Sinne von Parametern, die in die Optimierung mit aufgenommen werden können.



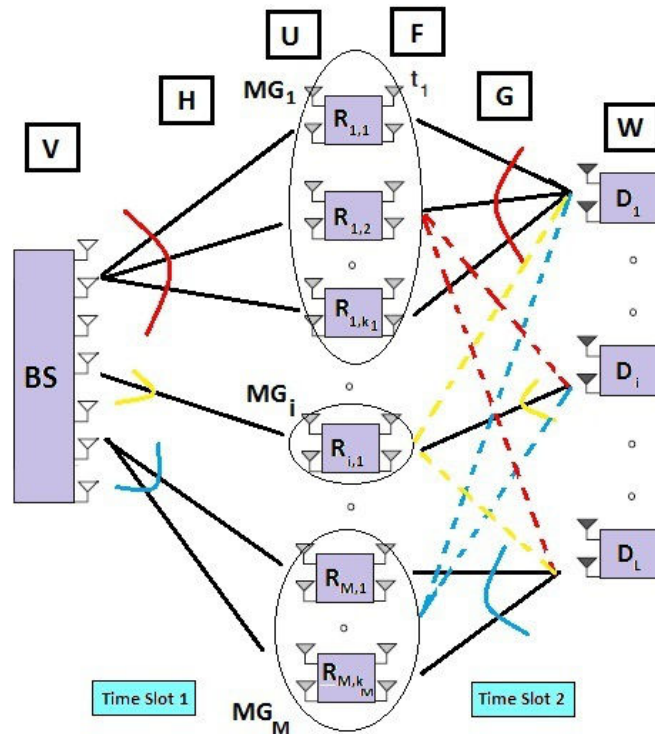


Abbildung 2.1: Das zugrundeliegende Kommunikationsszenario mit einer Basisstation, mehreren Relais-Knoten und mehreren Nutzern. Der Downlink-Kanal ist ein Broadcast-Relais-Kanal, wobei der Uplink-Kanal ein Mehrzugriffs-Relais-Kanal ist

## AP2: Performanzgrenzen

**Ziele:** Im AP2 wurde eine theoretische Basis ausgearbeitet, die es ermöglichte die fundamentalen Zusammenhänge zwischen dem Datendurchsatz, der Latenzzeit und der Zuverlässigkeit von Übertragungen zu analysieren. Darauf basierend wurden spektral effiziente und dienstgüteorientierte Sende- und Empfangsstrategien entwickelt. Die durch Mobilität bedingte Veränderung der Netztopologie, der Kanal- und Warteschlangenzustände, wurde explizit mitberücksichtigt. Es wurden Skalierungsgesetze hergeleitet um den Ressourcenbedarf bei wachsender Anzahl an Mini-Basisstationen und Mobilstationen abschätzen zu können.

### Skalierung der Multicast-Kapazität mit wachsender Anzahl der Nutzer

Ein wichtiges Projektszenario ist die Downlink-Übertragung unter der Annahme, dass mehrere Relaisknoten zur Verfügung stehen. Das Ziel der ersten Arbeiten im Arbeitspaket war die Ermittlung der Performanzgrenzen in der ersten Phase, d.h. zwischen der Quelle und den Relaisknoten. Die erste Phase entspricht in dieser Konfiguration einer

Multicast-Übertragung. In diesem Kontext wurde ein Szenario mit mehreren Sendean-  
 antennen am Sender angenommen und das Beamforming-Problem untersucht. Von beson-  
 derer Relevanz für das Projekt ist die Skalierung der Kapazität mit wachsender Anzahl  
 der Nutzer. Es wurde eine verbesserte untere Schranke für die Multicast-Beamforming-  
 Kapazität vorgeschlagen. In einem System mit einer Basisstation und  $K$  Nutzern, unter  
 der Annahme dass jeder Nutzer mit  $N_R$  Empfangsantennen ausgestattet ist, skaliert die  
 Kapazität für große  $K$  mindestens wie  $O(\frac{1}{K^{1/N_R}})$  (untere Schranke). Für den Fall einer  
 Empfangsantenne ergibt sich also die Skalierung  $O(\frac{1}{K})$ . Die neue Abschätzung ist eine  
 Verbesserung gegenüber der früher vorgeschlagenen Skalierung von  $O(\frac{1}{K^{2N_T+1}})$ .

Des weiteren wurde ein Übertragungsschema entwickelt, in dem ein fehlerkorrigierender  
 Code auf der Anwendungsschicht eingesetzt wird. Besonders sinnvoll ist im betrachteten  
 Szenario der Einsatz von ratenlosen Codes für die Anwendungsschicht. Die zu übertragen-  
 den Daten werden über mehrere Zeitblöcke und somit über mehrere Kanalrealisierungen  
 kodiert. Obwohl die Kodierung auf der Anwendungsschicht über mehrere Zeitschlitze er-  
 folgt, konnte es gezeigt werden, dass der optimale Ansatz für die Ressourcenallokation  
 nur die Optimierung für die momentane Kanalrealisierung erfordert. Das heißt, es ist  
 keine gemeinsame Optimierung über mehrere Kanalrealisierungen notwendig (sie wäre  
 auch unmöglich wegen Kausalität). Im Einzelnen, die optimale Strategie erfordert für  
 jede Kanalrealisierung das Maximieren des Produktes  $|\mathcal{S}|R_{\text{mc}}$ , wobei  $\mathcal{S}$  die Untermenge  
 der aktiven Nutzer bedeutet, die in der Lage sind, die aktuelle Übertragung, die effektiv  
 die Rate  $R_{\text{mc}}$  hat, zu dekodieren. In anderen Worten, das Ziel ist die Maximierung der  
 sogenannten Gruppen-Rate, die definiert ist als die Summe aller Raten, die dekodiert  
 werden können, und jeder Nutzer entweder dekodiert die gemeinsame Übertragung mit  
 Rate  $R_{\text{mc}}$ , oder kann nichts dekodieren. Entsprechende Algorithmen wurden im Rah-  
 men des AP5: Multicast ausgearbeitet und werden im weiteren Teil des Berichtes kurz  
 dargestellt.

Auch für dieses Schema wurde die Skalierung der Kapazität für die wachsende Anzahl  
 der Nutzer untersucht. Es wurde festgestellt, dass die Kapazität pro Nutzer gegen eine  
 positive Konstante konvergiert. Somit erzielt das vorgeschlagene Schema eine bessere  
 Performanz als im nicht kodierten Fall, in welchem die Kapazität pro Nutzer gegen Null  
 konvergiert. Diese Untersuchungen, präsentiert in [KPS11], bilden somit die Basis für die  
 Ermittlung der Performanzgrenzen für das gesamte Schema.

## Abtausch zwischen Energie-Effizienz und Spektraler-Effizienz

Der Abtausch zwischen Energieeffizienz (EE) und spektraler Effizienz (SE) in drahtlosen  
 Kommunikationsnetzen wurde betrachtet. Energieeffizienz wurde dabei durch die Grö-  
 ße Energie-pro-Bit (Eb) charakterisiert und bestimmt die Energiemenge, die erforderlich  
 ist, um ein Bit fehlerfrei bei einer bestimmten Datenrate zu übertragen. Im Allgemeinen  
 wird dabei sowohl die Sendeenergie *als auch die von Hardwarekomponenten verbrauchte*  
*Energie berücksichtigt*. Im Gegensatz dazu definiert man die spektrale Effizienz durch das  
 Verhältnis zwischen der Übertragungsrates und der benutzten Bandbreite. In der Vergan-  
 genheit stand vor allem die spektrale Effizienz im Fokus der Forschungsarbeiten, während  
 die Energieeffizienz weitgehend vernachlässigt wurde; vor allem die für Hardwarekompo-

menten verbrauchte Energie blieb beim Entwurf unberücksichtigt.

Wegen dramatisch steigender Energiekosten sind Mobilfunkbetreiber bestrebt, die oben erwähnte Größe  $E_b$  zu reduzieren. Gleichzeitig muss jedoch die spektrale Effizienz wegen exponentiell steigender Datenraten erhöht werden. Leider können im Allgemeinen beide Ziele nicht gleichzeitig erreicht werden, da es einen grundlegenden Abtausch zwischen den beiden Größen gibt, der auch als EE-SE-Abtausch bezeichnet wird (englisch: EE-SE tradeoff). Das Ziel des Projektes ist es, diesen Abtausch wegen seiner Bedeutung für die Wirtschaft und Wissenschaft näher zu untersuchen. Wenn die Energieeffizienz beim Systementwurf eine wichtige Rolle spielt, ist es sehr hilfreich, die Charakteristik des EE-SE-Abtausches zu kennen. Beispielsweise ist die Bestimmung des energieeffizientesten Betriebspunktes bei einer vorgegebenen spektralen Effizienz (die z.B. durch eine Quality-of-Service -Anforderung bestimmt ist) ein wichtiges Problem und erfordert auch eine Charakterisierung des EE-SE-Abtausches.

Der EE-SE-Abtausch kann für den Punkt-zu-Punkt-Kanal mit additivem weißen Gaußschen Rauschen (AWGN-Kanal) auf einfache Weise analytisch bestimmt werden. Für komplexere Kommunikationsnetze ist es meist nicht möglich, den Abtausch analytisch zu ermitteln. Das Verhalten des Abtausches kann jedoch oft numerisch, durch asymptotische Analysen oder durch die Bestimmung der Abtauschsteigungen in bestimmten Operationsbereichen näher charakterisiert werden. In der Literatur wurde der EE-SE-Abtausch für eine Vielzahl von drahtlosen Kommunikationsnetzen bereits untersucht. Im Rahmen des FundNet-Projektes wurde das Ziel verfolgt, diese Arbeiten auf ein Szenario mit mehreren parallelen Relaisstationen zu erweitern. Das untersuchte Szenario ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Es bestand aus einem Quellknoten, einem Zielknoten und zwei Relais, in der Literatur bekannt als das Rhombus-Netz (*eng. diamond network*). Die erarbeiteten Ergebnisse wurden in [BS12] veröffentlicht. Es wurden zwei wichtige Probleme mit Energie-Effizienz als Performanzmaß betrachtet.

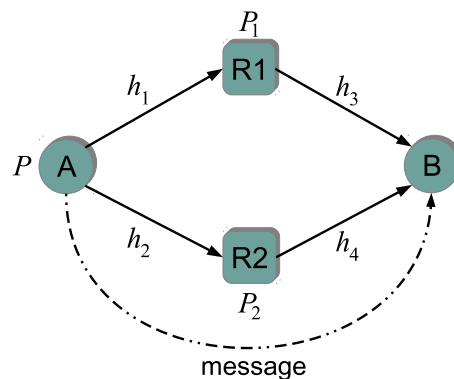


Abbildung 2.2: System-Modell des Rhombus-Netzts: Eine Nachricht wird vom Sender A zum Empfänger B über zwei Relais R1 und R2 gesendet. Es gibt keinen direkten Link zwischen Sender und Empfänger.

Das Ziel des ersten analysierten Problem ist es, die spektrale Effizienz zu maximieren, unter der Bedingung, dass die Energie-pro-Bit an der Quelle und an den Relais einen vorgegebenen Wert nicht überschreitet. Unter der Annahme relaxierter Bedingungen konnte gezeigt werden, dass eine Fixpunktiteration (*fixed-point iteration*) zur optimalen Lösung konvergiert. Dies wurde ermöglicht indem die Funktion der spektralen Effizienz als die sogenannte Standardinterferenzfunktion identifiziert wurde. Motiviert durch diesen Ansatz, es wurde auch eine algorithmische Lösung für das (nicht relaxierte) Ausgangsproblem vorgeschlagen. Das zweite betrachtete Problem besteht darin, den Energieverbrauch zu minimieren, bei einer vorgegebenen spektralen Effizienz und der Annahme, dass die Sendeleistungen an den Relais gleich sind. Durch geeignete Analyse der Problemstruktur konnte auch hier eine effiziente algorithmische Lösung vorgeschlagen werden.

### Performanzgrenzen bei beschränkter Information über den Kanalzustand

Es ist bekannt, dass adaptive Sendestrategien eine signifikante Performanz-Steigerung gegenüber nicht adaptiven Sendestrategien besitzen. Adaptive Sendestrategien benötigen allerdings sehr genaue Informationen über den Kanalzustand, ohne diese Information ist kein signifikanter Gewinn gegenüber nicht adaptiven Sendestrategien möglich. In den beiden Arbeiten [WSJ12], [WJS12], [WRSJ13] und [SJS13] wurden deshalb verschiedene Verfahren zur Messung, Kompression und Übertragung der Kanalzustandsinformation entwickelt und untersucht. Die Performanzgrenzen wurden in beiden Arbeiten anhand des zu erwartenden Raten-Verlustes,

$$\Delta R := \mathbb{E}_H [R(\Pi_H, \mathcal{S}_H; H) - R(\Pi_V, \mathcal{S}_V; H)]. \quad (2.1)$$

evaluiert. Hierbei sind  $R(\Pi_H, \mathcal{S}_H; H)$  und  $R(\Pi_V, \mathcal{S}_V; H)$  die Raten bei idealer bzw. partieller Kanalzustandsinformation am Sender.

In der Arbeit [WRSJ13] wurden, aufbauend auf der Arbeit [WSJ12], bekannte Ergebnisse aus der Literatur auf eine breitere Klasse von Systemen zu erweitern. Diese breitere Klasse von Systemen enthält sowohl den Interferenzkanal als auch den inferierenden Broadcast Kanal. Beide Modelle sind Teil der die in diesem Projekt definierten Relais-Kanäle.

Eines der Kernergebnisse aus der Arbeit [WRSJ13] zeigt die Skalierung des Raten-Verlustes in Abhängigkeit von der Genauigkeit der Kanalzustandsinformation. Hierbei wird die Genauigkeit anhand der Rate, die der Feedback-Kanal unterstützen kann, gemessen. Zusammenfassend kann man sagen, dass bei einem Feedback Kanal mit einer Rate von  $B$  Bits pro Feedback Message der Raten-Verlust beschränkt ist durch

$$\Delta R \leq 4n_s \log \left( 1 + Pn_t \mathbb{E}_H \left[ 2^{-\frac{B}{2(n_t-1)}} \right] \right),$$

Abbildung 2.3 zeigt die spektrale Effizienz mit perfekter Kanal Kenntnis und die untere Schranke  $R(\Pi_H, \mathcal{S}_H; H) - \Delta R$ .

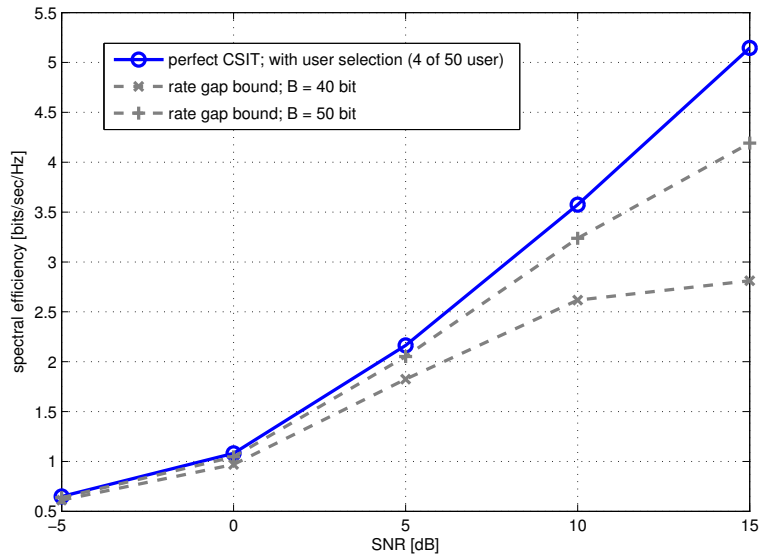


Abbildung 2.3: Spektrale Effizienz über SNR; mit perfekter Kanal Kenntnis sowie die untere Schranke für 40 und 50 bit.

**Performanz von Feedback Protokollen basierend auf compressed sensing und matrix recovery** In der Arbeit [SJS13] wurde ein neues Verfahren zur Messung, Kompression und Übertragung der Kanalzustandsinformation entwickelt und die Performanzgrenzen des Verfahrens untersucht. Das entwickelte Verfahren basiert auf aktuellen Arbeiten aus den Bereichen *compressed sensing* und *matrix recovery*. Eine genaue Beschreibung des Verfahrens ist in AP3 zu finden.

**Performanz von Feedback Protokollen für Kodebuch basierte Sendestrategien** In den Arbeiten [WJS12] und [WSJ12] wurde die erste Phase eines zweistufigen Relais-Kanals untersucht. Es wurde angenommen, dass die Basisstation keine perfekte Kanalkennntnis hat und zu mehreren Nutzern (Relais-Knoten) gleichzeitig und auf gleichen spektralen Ressourcen sendet. Hierbei werden die unterschiedlichen Datenströme durch lineares Beamforming getrennt. Eine zentrale Annahme der Arbeit ist, dass die Beamforming-Vektoren durch ein festes Sendekodebuch definiert sind.

In den Arbeiten [WJS12] und [WSJ12] wurde der Ratenverlust, der durch die partielle Kanalkennntnis entsteht, untersucht. Es wurde gezeigt, dass, verglichen mit adaptivem Beamforming (zum Beispiel Zero-Forcing (ZF) Beamforming), mit einem festen Sendekodebuch eine bessere Skalierung (in der Anzahl der Feedback-Bits) des Ratenverlustes erreicht werden kann. Essentiell für das Erreichen der besseren Fehler-Skalierung ist die Verwendung der richtigen Quantisierungs-Metrik. Die optimale (aber komplexe) und eine suboptimale (aber effiziente) Quantisierungs-Metrik wurden in den Arbeiten hergeleitet. Abbildung 2.4 vergleicht das in dieser Arbeit entwickelte Feedback- und Sendeprotokoll (RA) mit ZF. Man sieht, dass ZF bei idealer Kanalkennntnis klar vorne liegt. Bei be-

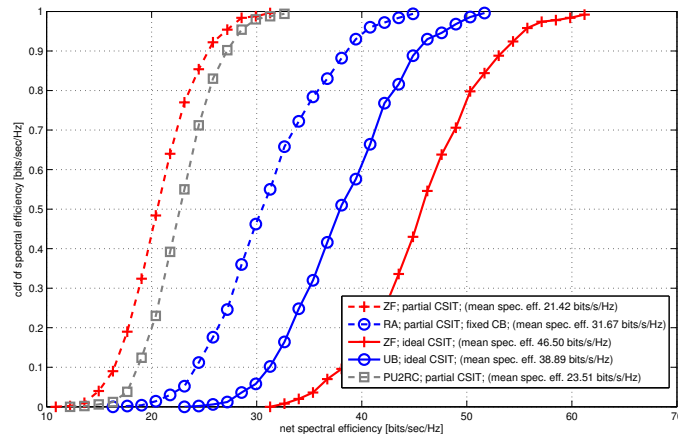


Abbildung 2.4: CDF der spektralen Effizienz; Vergleich von ZF und fixed Codebook basierten Sendestrategien. Jeweils mit perfekter und partieller Kanalkennntnis.

schränkter Kanalkennntnis gewinnt der entwickelte Ansatz jedoch deutlich.

### AP3: Relaying und Kooperative Diversität

**Ziele:** Die Zielsetzung bestand darin, den bidirektionalen Relais-Kanal zu verstehen und daraus optimale Übertragungs- und Kodierungsstrategien zu entwickeln. Die Resultate sollten auf bidirektionale Relais-Kanäle mit einer beliebigen Anzahl an Relais-Knoten erweitert werden. Der Einfluss von Interferenz ist dabei explizit zu untersuchen. Zudem sollen Ideen, Konzepte und Schemata der “Physikalischen Netz-Kodierung” entwickelt und analysiert werden.

#### Kooperative Diversität mit ratenloser Codierung

Die Möglichkeit einer Kooperation während der Uplink-Übertragung wurde in [LKS11] analysiert. Das Systemmodell im analysierten Szenario wird in Abb. 2.5 dargestellt.

Es wurde ein Schema vorgeschlagen, wo der Einsatz von ratenloser Kodierung zur erhöhten Datenrate und besserer Robustheit führt. Ferner wird angenommen, dass die Modulation und die Coderate (auf der physikalischen Schicht) nur anhand der mittleren Kanalqualität gewählt werden. Dadurch hat das entwickelte Schema geringere Anforderungen an die Information über den Kanalzustand als das herkömmliche Schema, in dem die Übertragung immer an den momentanen Kanalzustand angepasst wird. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass am Rand einer Zelle eine Region existiert, in der die Performanz der kooperativen Übertragung strikt besser als die des traditionellen Ansatzes (Verbindung nur mit einer Basisstation) ist. Das Schema der kooperativen Übertragung nennen wir Virtual Soft Handover (VSHO). Seine wichtigsten Vorteile sind:

- Robuste QoS (Quality-of-Service) am Zellenrand

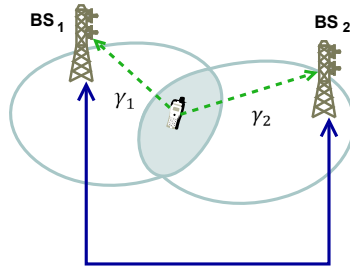


Abbildung 2.5: Das Systemmodell der kooperativen Uplink-Übertragung.  $\gamma_m$  bezeichnet das SINR zwischen dem Nutzer und der  $m$ -ten Basisstation, das Überlappungsgebiet beinhaltet die Region, in der das Virtual Soft Handover (VHSO) vorgenommen werden kann.

- Einfach implementierbar nur durch Anpassungen der Anwendungsschicht
- Kein schichten übergreifender Entwurf der physikalischen Schicht notwendig
- Verringerter Signalisierungsaufwand; beim Einsatz von ratenloser Kodierung sind die ACK/NACK-Nachrichten zum Bestätigen des Empfangens bzw. des Nicht-Empfangens eines jeden Pakets nicht notwendig.
- Kleine Anforderungen bezüglich der Kanalzustandsinformation
- Es werden nur “harte Bits” zwischen den Basisstationen ausgetauscht, daher weniger Netzlast im Rückgradnetz (backbone network).

Der Performanzgewinn wird trotz des geringeren Feedbacks über den Kanalzustand erzielt. Ferner wurde der Einfluss von unterschiedlichen Codes auf der physikalischen Schicht (Faltungscodes, Turbocodes) und der Einfluss von der Interferenz untersucht. Die Performanz des vorgeschlagenen Schemas und die Regionen, in denen das VSHO-Verfahren dem herkömmlichen Ansatz überlegen ist, werden in den Abb. 2.6 und 2.7. Es kann festgestellt werden, dass unter Verwendung sowohl von Faltungscodes wie auch von Turbo-Codes eine Region existiert, in der das VSHO-Verfahren eindeutig besser als das harte Handover ist. Die Performanzgewinne sind jedoch größer bei den Faltungscodes als auch bei den Turbo-Codes.

### Kontrollprotokoll für drahtlose Relais-Netzwerke

In der Arbeit [SS12] wurde ein Feedback- und Kontrollprotokoll für drahtlose Relais-Netzwerke entwickelt. Das Protokoll basiert auf Schätzungen der größten Eigenwerte der Kanalleistungsmatrix. Die größten Eigenwerte der Kanalleistungsmatrix sind eine wichtige Kenngröße zur Steuerung und Kontrolle von Netzwerken. In der Arbeit wurde gezeigt, dass das entwickelte Protokoll den Trainings- und Feedback Overhead signifikant reduziert.

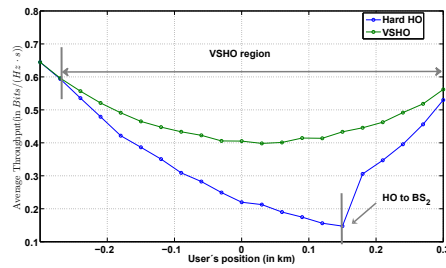


Abbildung 2.6: Durchsatz bei Verwendung von Faltungscodes.

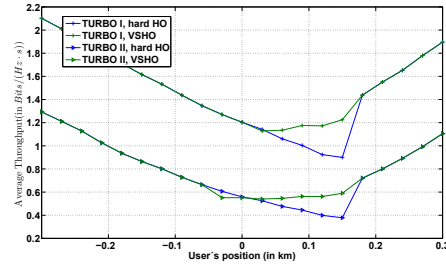


Abbildung 2.7: Durchsatz bei Verwendung von Turbocodes.

### Bidirektionaler Relais-Kanal (Zwei-Wege Relais-Kanal)

Im Rahmen des Projektes wurde der bidirektionale Relais-Kanal (auch Zwei-Wege-Relais-Kanal genannt) intensiv untersucht, der eine wichtige Komponente in künftigen relaisgestützten Mobilfunknetzen bilden wird.

Es wird angenommen, dass Relais-Knoten im half-duplex Modus arbeiten und somit liegt der Fokus auf dem eingeschränkten Zwei-Wege-Relais-Kanal (Engl. restricted two-way relay channel), in dem zwei Terminale ihre Nachrichten mit Hilfe eines Relais-Knotens austauschen. Der einzige Zweck des Relais-Knotens ist die Unterstützung der Kommunikation zwischen den beiden Terminalen (End-Nutzern), er hat keine eigene Nachricht. Die Zwei-Wege-Übertragung ist eingeschränkt im klassischen Sinne, sodass die Terminale die Ausgänge ihrer Dekodierer nicht für die Kodierung der Nachrichten verwenden können. Wir nehmen an dass alle Knoten im half-duplex Modus arbeiten, das heißt sie können nicht gleichzeitig senden und empfangen. Folglich ist die Übertragung in zwei Phasen aufgeteilt, die Mehrzugriffskanal-Phase (multiple access channel, MAC) und die Broadcast-Phase. Die beiden Phasen sind orthogonal zueinander (mit Hilfe von TDMA).

Die half-duplex Beschränkung scheint die Gewinne auszuschließen, die in einer klassischen Zwei-Wege-Kommunikation erreichbar sind, da keine gleichzeitige Kommunikation zwischen den Knoten möglich ist. Es stellt sich jedoch heraus dass mit Hilfe von einem Relais-Knoten Gewinne doch erreicht werden können. Die meisten heutigen Relaying-Protokolle weisen den Links exklusive Ressourcen zu, was zu einem unvermeidbaren Verlust hinsichtlich der spektralen Effizienz führt. Anstatt aber jeden Link als einen



unabhängigen Nutzer zu betrachten, können die Eigenschaften des drahtlosen Mediums (Funkkanals) genutzt werden, und die Verluste werden signifikant reduziert. Das Kommunikationsprotokoll eines klassischen bidirektionalen Relais-Kanals kann wie folgt zusammen gefasst werden. In der ersten Phase, der so-genannten MAC-Phase, senden zwei Funkknoten (Nutzer) ihre informationstragenden Symbole zu einem Relais-Knoten. In der zweiten Phase, der bidirektionalen Broadcast-Phase (BBC-Phase), kodiert der Relais-Knoten die empfangenen Daten derart, dass die beiden Funkknoten die Daten des jeweils anderen Nutzers unter Zuhilfenahme der eigenen Informationssymbole aus der ersten Phase dekodieren können. Die Arbeiten zu diesem Thema haben sich im FundNet-Projekt auf die Broadcast-Phase fokussiert, den so genannten bidirektionalen Broadcast-Kanal. Da die erste Phase als abgeschlossen angenommen wird, ist es nämlich eine Broadcast-Übertragung mit Nebeninformation (Eng. side information).

In [WBB10a] wird der bidirektionale Relais-Kanal in Netzen untersucht (inklusive die erste Phase). Genauer gesagt wird angenommen, dass die Knoten unbekannte Interferenz empfangen und diese mit Hilfe von beliebig variierenden Kanälen (AVC) modellieren. Unter der Annahme eines AWGN-Kanals mit additiver unbekannter Interferenz wird die Kapazitätsregion des bidirektionalen Broadcast-Kanals bewiesen, wobei sowohl deterministische als auch zufällige Kodierung betrachtet wird. Die Referenz [WBB10b] untersucht dagegen den bidirektionalen Broadcast-Kanal mit List-Decoding. Es wird gezeigt, dass List-Decoding im Falle beliebig variierender Kanäle gewinnbringend ist. Man findet immer eine (endliche) Listengröße an den Empfängern, so dass für (deterministisches) List-Decoding die Kapazitätsregion nicht leer ist und der randomisierten Kapazitätsregion entspricht.

Die Arbeit [WBB10c] beschäftigt sich auch mit dem bidirektionalen Broadcast-Kanal für beliebig variierende Kanäle, wobei bestimmte Bedingungen an die zulässigen Send- und Zustandssequenzen vorausgesetzt werden. Es werden die Kapazitätsregionen für die deterministische und zufällige Kodierung bewiesen. In [WOB10] wird der bidirektionale Broadcast-Kanal mit zusätzlicher "Common Message" in der Broadcast Phase betrachtet. Die Relaisstation sendet die Nachrichten und eine zusätzliche Multicast-Nachricht. Es wird die Kapazitätsregion des MIMO-Gauß-Kanals bestimmt und das entsprechende Optimierungsproblem analysiert, um die optimalen Sendestrategien zu charakterisieren. Die Referenz [WBOB10] analysiert den bidirektionalen Broadcast-Kanal mit Unsicherheit in der Kanalzustandsinformation an der Relaisstation. Diese Unsicherheit wird so modelliert, dass der Sender zwar den Kanal nicht kennt, aber er weiß, dass die Kanalrealisierung zu einer vordefinierten Menge der möglichen Kanalzustände gehört. In der Arbeit wird eine robuste Kodierungsstrategie vorgestellt, die eine zuverlässige Kommunikation über diesen so genannten bidirektionalen Compound-Broadcast-Kanal ermöglicht. Weiterhin wird gezeigt, dass diese Strategie die Kapazität dieses Kanals erreicht.

Darüber hinaus wurde in [WOB11] ein Mehrantennen-BBC-Kanal mit einer zusätzlichen gemeinsamen Nachricht untersucht. Die Kapazitätsregion der Broadcast-Phase wird präsentiert bestimmt und das Problem der Optimierung von Send-Kovarianzmatrizen analysiert. Dabei stellt es sich heraus, dass das Optimierungsproblem sehr ähnlich zu dem Problem der Optimierung von Send-Kovarianzmatrizen beim BBC-Kanal ohne gemeinsame Nachrichten ist. Dadurch lassen sich Sendestrategien des BBC-Kanals ohne gemein-

same Nachrichten leicht auf das Szenario des BBC-Kanals mit gemeinsamen Nachrichten übertragen.

Weitere Arbeiten zum Thema bidirektionaler Relais-Kanal haben sich auf die Aspekte der Informationssicherheit fokussiert und werden in der Beschreibung des AP8 kurz dargestellt. Es wurden auch Untersuchungen zum allgemeinen bidirektionalen Relais-Kanal in Verbindung mit ratenlosen Kodierung und Netzkodierung durchgeführt. Die Ergebnisse der entsprechenden Arbeiten [MS12b] und [MS12c] werden im AP6: Netzkodierung zusammengefasst.

### Kontrolprotokoll für drahtlose Relais-Netzwerke

In der Arbeit [SS12] wurde ein Feedback- und Kontrolprotokoll für drahtlose Relais-Netzwerke entwickelt. Das Protokoll basiert auf Schätzungen der größten Eigenwerte der Kanalleistungsmatrix. Die größten Eigenwerte der Kanalleistungsmatrix sind eine wichtige Kenngröße zur Steuerung und Kontrolle von Netzwerken. In der Arbeit wurde gezeigt, dass das entwickelte Protokoll den Trainings- und Feedback Overhead signifikant reduziert.

Das entwickelte Protokoll nutzte die Potenzmethode um den spektralen radius  $\rho(\mathbf{W})$  der Matrix  $\mathbf{W}$  zu berechnen. Der Feedback- und Mess-Overhead kann wie folgt quantifi-

---

**Algorithm 1** Feedback of  $\rho(\mathbf{W})$  based on power iteration

---

1. All RNs transmit pilot signals with random powers given by  $\mathbf{q}(1)$ , with  $\|\mathbf{q}(1)\|_1 = P^{(2)}$ .
2. Iteration  $n = 1, 2, \dots, N$ 
  - a) All UEs  $k = 1, \dots, K$  measures and feed back

$$v_k(n) = [\mathbf{W}\mathbf{q}(n)]_k$$

to the BS and all RNs.

- b) All RNs simultaneously transmit pilot signals with power

$$\mathbf{q}(n+1) = \frac{P^{(2)}\mathbf{W}\mathbf{q}(n)}{\|\mathbf{W}\mathbf{q}(n)\|_1}$$


---

ziert werden. In jedem Iterationsschritt sendet jedes Relay einen Piloten. Jeder Empfänger sendet eine reelle Zahl pro Iterationsschritt zurück. Also ist der Messoverhead  $N$  und der Feedbackoverhead  $NK$ . Im Vergleich zu einem System wo jeder Empfänger seinen Kanal misst und den Kanal quantisiert und an den Sender überträgt ist der Messoverhead gleich der Anzahl der Sender  $K$  und der Feedbackoverhead  $K^2$ . Für ein System mit vielen Nutzern  $K \gg N$  ist unser Protokoll eindeutig effizienter.

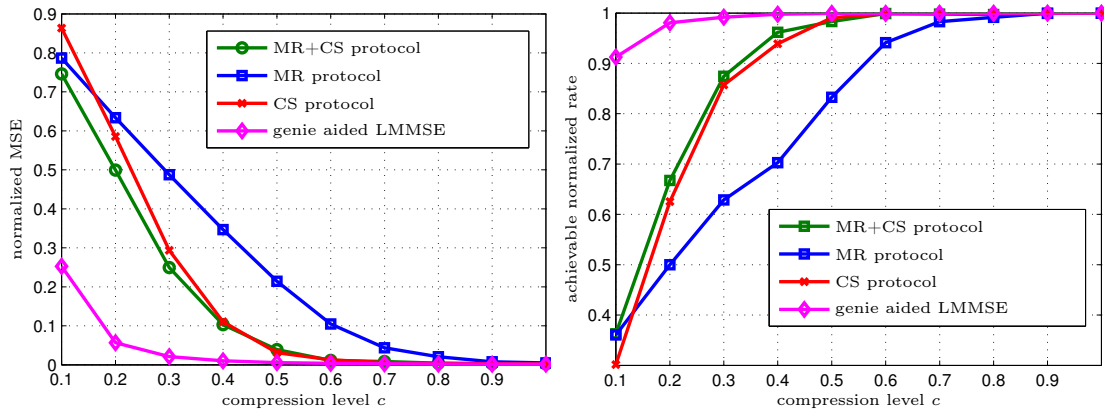


Abbildung 2.8: Normalisierter MSE (links) und erreichbare normalisierte Rate (rechts) über Kompressionslevel  $c$  für verschiedene Rekonstruktionsalgorithmen.

### Verfahren zur Messung, Kompression und Übertragung der Kanalzustandsinformation

In der Arbeit [SJS13] wurde ein Verfahren zur Messung, Kompression und Übertragung der Kanalzustandsinformation in Relais-Netzwerke entwickelt. Das Feedback-Protokoll nutzt die Kompressibilität der Kanalmatrix und erreicht hierdurch eine Reduktion des Feedback und Training Overheads von rund 50%. Das entwickelte Protokoll nutzt die jüngsten Entwicklungen in den Bereichen *low rank matrix recovery* und *compressed sensing* um die Kanalmatrix durch eine Matrix mit niedrigerem Rang zu approximieren.

Das Feedback Protokoll besteht im wesentlichen aus zwei Schritten:

1. Kanalmessung und Quantisierung von den Nutzern.
2. Kanalrekonstruktion am Sender.

Eine detaillierte Beschreibung des Protokolls kann in [SJS13] gefunden werden. Abbildung 2.8 zeigt den MSE und spektrale Effizienz für verschiedene Feedback Protokolle.

### AP4: Ressourcenallokation / Interferenzmanagement

**Ziele:** Im Rahmen dieses Arbeitspaketes sollte die Allokation von Mobilfunknetz-Ressourcen untersucht, wobei der Uplink-Kanal und der Downlink-Kanal weitgehend getrennt betrachtet wurden. Unter Verwendung fortschrittlicher Mehrantennen-Techniken, sollte eine Vielzahl von Übertragungsstrategien erarbeitet werden. Ferner sollten Kriterien formuliert werden, die die adäquate Wahl einer bestimmten Strategie, in Abhängigkeit von Kanal- und Seiteninformation, Mobilität, Datenkorrelation usw., begünstigen. Außerdem sollten kooperative Verfahren zum Interferenzmanagement untersucht werden, die mittels Leistungskontrolle, Scheduling, Beamforming und Kodierung Verfahren wie Interferenz-Vermeidung/-Löschung/-Formung ermöglichen. Es sollte eine Gesamtoptimierung mehrerer Schichten des Protokollstapels betrachtet werden mit dem Ziel ein schichtübergreifendes (cross-layer) Design zu erreichen.

Die ersten Arbeiten in diesem Arbeitspaket haben sich hauptsächlich auf den Kanal von den Relaisstationen zu den Mobilstationen konzentriert (die zweite Phase des Downlink-Kanals). Es wurde zuerst ein Interferenzkanal betrachtet in dem jede Relaisstation die Daten zu genau einer Mobilstation überträgt. Das Ziel ist eine Gesamt-Nutzfunktion unter bestimmten Nebenbedingungen zu maximieren. Die Interferenz wird dabei als Rauschen betrachtet und die Nutzfunktion wird im Allgemeinen bezüglich der Sendeleistungen, Sende- und Empfangsbeamformer optimiert.

### Optimale Leistungsallokation im Interferenzkanal

Das Ziel der Arbeit [SFWB10] ist es, eine gegebene Gesamt-Netzfunktion der Raten unter zusätzlichen Bedingungen an die Mindestratenanforderungen zu maximieren. Dabei werden nur Sendeleistungen für beliebige aber feste Beamforming-Vektoren optimiert. Die Hauptherausforderung besteht in einer verteilten Implementierung der Verfahren, weil die Kommunikation zwischen den Relaisstationen möglichst zu vermeiden ist. In der Arbeit werden zwei iterative Verfahren entwickelt, die eine relativ effiziente Umsetzung in verteilten Netzen erlauben. Die in dieser Arbeit vorgeschlagen Algorithmen lassen sich bei dem im Projekt anvisierten Zwei-Hop-Relais-Szenario anwenden, um die erste Phase bei der Optimierung der zweiten Phase im Downlink-Kanal zu berücksichtigen.

Das Problem der Optimierung der Sendeleistungen in der zweiten Phase des Downlink-Kanals wird auch weiter in den Arbeiten [SKG11a] und [SKG11b] erörtert. Hier steht aber Max-Min-Fairness im Fokus die eng mit der Maximierung des schlechtesten Nutzers im Sinne des SINRs verwandt ist. Es gibt mindestens zwei Gründe warum Max-Min-Fairness wichtig ist: 1) diese Strategie erfüllt Ratenanforderungen der Nutzer, wenn diese Anforderungen erfüllbar sind und 2) die Maximierung des schlechtesten Nutzers erreicht oft die Interferenzalignment. Die Arbeit [SKG11a] charakterisiert die Eigenschaften der optimalen Leistungsallokation, und es konnte insbesondere gezeigt werden, dass in einem vollständig durch die Interferenz gekoppelten Netzwerk die Lösung eindeutig ist. Die Bedingung der vollständigen Interferenzkopplung kann als Irreduzibilität der sogenannten gain matrix ausgedrückt werden. Darüber hinaus wird es gezeigt, dass die Max-Min-Fairness durch die Optimierung einer speziell gewählten Gesamt-Nutzfunktion erreicht wird. Basierend darauf wird die Max-Min-Fair-Leistungsallokation mit Hilfe eines Sattelpunktes charakterisiert:

$$\theta(\rho(\mathbf{B})) = \max_{\mathbf{u} \in \Pi_K} \min_{\mathbf{p} \in \mathcal{P}} G(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = \min_{\mathbf{p} \in \mathcal{P}} \max_{\mathbf{u} \in \Pi_K} G(\mathbf{u}, \mathbf{p})$$

In der obigen Charakterisierung,  $\rho(\cdot)$  bezeichnet den spektralen Radius,  $\mathbf{B}$  die erweiterte gain matrix (sie hängt von allen Links im Netz sowie von den Leistungsbeschränkungen ab),  $\mathbf{u} \in \Pi_K$  den Gewichtenvektor,  $\mathbf{p} \in \mathcal{P}$  den Leistungsvektor (die Leistungsallokation, an der wir letztendlich am meisten interessiert sind),  $\theta(\cdot)$  eine skalare Nutzfunktion, und  $G(\mathbf{u}, \mathbf{p})$  die Gesamt-Nutzfunktion, gegeben als

$$G(\mathbf{u}, \mathbf{p}) = \sum_{k \in \mathcal{K}} u_k \theta\left(\frac{1}{\text{SIR}_k(\mathbf{p})}\right),$$

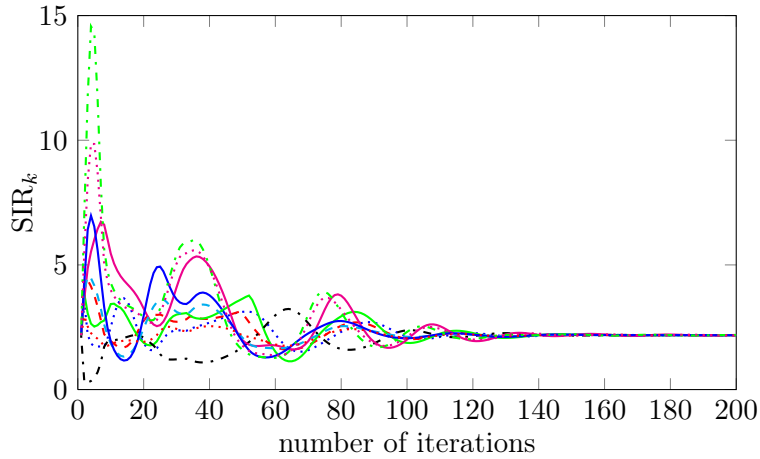


Abbildung 2.9: Die Konvergenz der SIR für  $|\mathcal{K}| = 10$  Nutzer.

d.h. Summe der einzelnen Nutzfunktionen über alle Nutzer.

Das Ergebnis ermöglicht den Zugang zu verteilten Algorithmen für Leistungskontrolle. In der Arbeit wird ein verteilter Algorithmus vorgeschlagen und seine Konvergenz zur Max-Min-Fairness bewiesen. Im Vergleich zu anderen bekannten Verfahren erfordert der Algorithmus eine stark reduzierte Koordination zwischen den Stationen. Vereinfacht, kann der Algorithmus wie folgt zusammengefasst werden:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}(n+1) &= P_{\Pi_K}[\mathbf{u}(n) + \delta \nabla_{\mathbf{u}} G(\mathbf{u}(n), e^{\mathbf{s}(n)})] \\ \mathbf{s}(n+1) &= P_S[\mathbf{s}(n) - \delta \nabla_{\mathbf{s}} G(\mathbf{u}(n), e^{\mathbf{s}(n)})] \end{aligned}$$

Hier bedeutet  $\mathbf{s} = \log(\mathbf{p}) \in \mathcal{S}$  den logarithmischen Leistungsvektor,  $\delta$  die Schrittgröße und  $P_{\Pi_K}$  und  $P_S$  die notwendigen Projektionen. Der Algorithmus ist verteilt implementierbar und ermöglicht eine schnelle Konvergenz der einzelnen SIRs, was in Abb. 2.9 beobachtet werden kann.

In [SKG11b] werden *verteilte* Verfahren zur Sende- und Empfangsfilteroptimierung in Verbindung mit der Leistungskontrolle entwickelt und untersucht. Die Leistungskontrolle garantiert die Monotonie der Algorithmen bezüglich der SINR-Werte.

In [GS11] werden ähnliche Ziele verfolgt und verteilte Algorithmen für Leistungskontrolle vorgestellt. Der im Vergleich zu den beschriebenen Arbeiten grundlegende Unterschied besteht in dem verwendeten Ratenmodell, das Übertragungsfehler und ARQ-Protokolle berücksichtigt. Dieses Modell erzeugt ein Auslöschungskanal und stellt gleichzeitig eine einfache Verbindung zu unteren Schichten (Leistungskontrolle und Beamforming) her. Somit wird eine Grundlage für die Analyse der Netzkodierung gelegt, die unter der Annahme von Auslöschungskanälen entwickelt wird.

### Effiziente Allokation von diskreten Ressourcen (Relais)

Multi-Armed-Bandit (MAB) Spiele können als eine Klasse von sequentiellen Optimierungsproblemen kategorisiert werden. In der klassischen Form des MAB wählt ein Spieler

in jedem Zug eine Aktion um eine Belohnung zu erhalten. Die Belohnungen der Aktionen sind den Spielern nicht im Voraus bekannt, aber beim Wählen einer Aktion wird der Spieler durch ein Feedback-Signal, in der Regel mit begrenzter Information, über den Ausgang des Spiels informiert. Als *Regret* wird der Unterschied zwischen der optimalen Belohnung und der Belohnung der tatsächlich gewählten Aktion bezeichnet. Das Optimierungsziel besteht darin, den akkumulierten Regret zu minimieren. Der optimale Ansatz erfordert Gleichgewicht zwischen *exploitation* (Wahl der besten bekannten Aktion) und *exploration* (Suche nach einer neuen optimalen Aktion). Dieses Framework eignet sich insbesondere für effizientes Lösen der Optimierungsprobleme in drahtlosen Netzwerken, in denen diskrete Ressourcen vorhanden sind. Im Projektszenario werden Sender als Spieler, Relais als Aktionen und Durchsatz als Belohnung modelliert.

In [MS13a] werden zwei Relaying-Szenarien mit Hilfe des MAB-Spiels betrachtet. Der Schwerpunkt der Arbeit [MS13a] liegt auf einer Teilmenge stochastischer MAB-Probleme, den Banditen mit Nebeninformationen (engl.: *covariate bandits*). Um das Gleichgewicht zwischen *exploitation* und *exploration* zu finden, werden zwei Allokationsstrategien vorgeschlagen. In [MS13b] werden diese Allokationsstrategien zu einem Szenario mit mehreren Spielern erweitert. In [MS13c] untersuchen wir ein drahtloses Netz, in dem die Sender über keine Kanalzustandsinformationen verfügen.

In der numerische Analyse, betrachten wir ein Netzwerk mit einem Nutzer. Wir vergleichen die Leistung unserer Algorithmen mit vier anderen Relais-Auswahl Verfahren: 1) Optimale Auswahl: perfekte globale Kanalzustandsinformation (CSI) wird angenommen. 2) Banditen mit Nebeninformation: Dieses Szenario entspricht unserem Algorithmus, wobei die Banditen zusätzliche Nebeninformationen haben. 3) Greedy-Ansatz: in diesem Fall, wählt der Spieler immer das Relais mit dem höchsten empirischen Mittelwert. 4) Bernoulli Bandit: hier es wird angenommen, dass die Relais entweder frei oder besetzt sind, nach einer Bernoulli-Verteilung mit unbekanntem Eigenschaften. Die Quelle wählt immer die Relais, die mit der höchsten Wahrscheinlichkeit frei sind. 5) Random Szenario: Hier werden die Relais zufällig (uniform) nach ausgewählt. Abbildungen 2.10 und 2.11 zeigen den durchschnittlichen Daten Durchsatz des Nutzers über steigender Spieldauer bzw. Anzahl von Relais. Im Gegensatz zu [MS13a], wo nur ein Spieler (ein Sender) angenommen wurde, sind im [MS13c] mehrere Spieler (Sender) vorhanden, die um die Ressourcen konkurrieren. Unter diesen Annahmen wird das Problem der Relaisauswahl und -zuordnung als ein kontradiktorischer Multi-Player Multi-Aktion Bandit-Spiel formuliert. Basierend auf dieser Formulierung werden einige Strategien vorgeschlagen, die zum Correlated-Gleichgewicht konvergiert. Darüber hinaus zeigt die Anwendung des experimentellen Regret-Testprotokolls, dass die empirischen Frequenzen zum Nash-Gleichgewicht (*Nash equilibrium*) konvergieren. Zum numerische Analyse, betrachten wir ein Netzwerk mit mehreren Nutzern. Wir vergleichen die Leistung unseres Algorithmus mit drei anderen Relais-Auswahl Schemas, wie im Folgenden beschrieben ist: 1) jede Quelle wählt ein Relais mit Kanalkennntnis (Ind-Re), 2) jede Quelle nutzt unsere Relais-Auswahl Algorithmus ohne Kanalkennntnis (Cor-Re), 3) jede Quelle wählt Relais wählt einfach nach dem Uniformen Distribution (Rnd-Re), 4) jede Quelle nutzt die Regret-Testprotokoll (NSH-Re). Abbildung 2.12 stellt den durchschnittlichen Daten Durchsatz den Nutzern von unterschiedlichen Strategien dar, wo Anzahl der Nutzern verändert sich

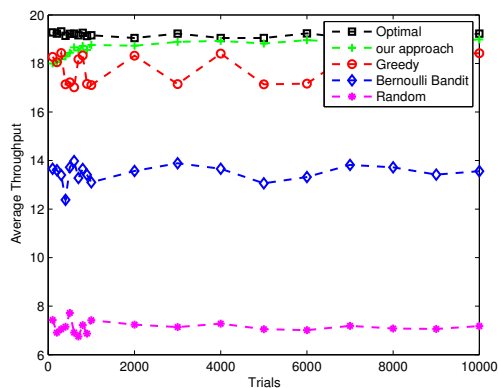


Abbildung 2.10: Durchschnittlichen Daten Durchsatz des Nutzers über aufsteigend Spieldauer

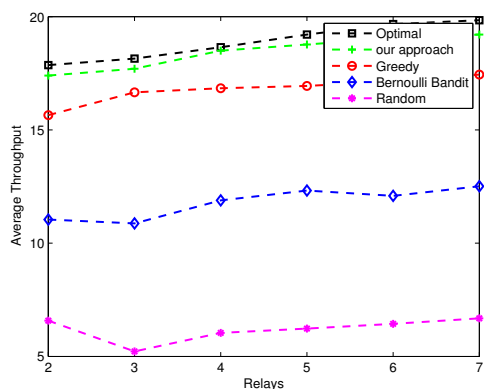


Abbildung 2.11: Durchschnittlichen Daten Durchsatz des Nutzers über Anzahl von Relais

nicht, jedoch Anzahl den Relais steigt an. Abbildung 2.13, an die andere Seite, zeigt den durchschnittlichen Daten Durchsatz den Nutzern von unterschiedlichen Strategien, wo Anzahl der Relais verändert sich nicht, jedoch Anzahl den Nutzern steigt an.

### Effiziente Spektrum Allokation in relaisgestützten Mobilfunknetzen

In der Arbeit [MS11] wird eine Strategie zur Ressourcenallokation für die Abwärtsstrecke der im Projekt betrachteten relaisgestützten Mobilfunknetze entwickelt. Für die erste Phase (Sender → Relais) wird wie üblich ein zentralgesteuertes Verfahren für eine gemeinsame Leistungs- und Unterträger-Allokation vorgeschlagen. Für die zweite Phase (Relais → Empfänger) wird dagegen eine dezentraler spieltheoretischer Ansatz zur Leistungs- und Unterträger-Allokation verfolgt. Das betrachtete Szenario setzt voraus, dass die Kanaldämpfung eines Übertragungslinks in der zweiten Phase kleiner als die des entspre-

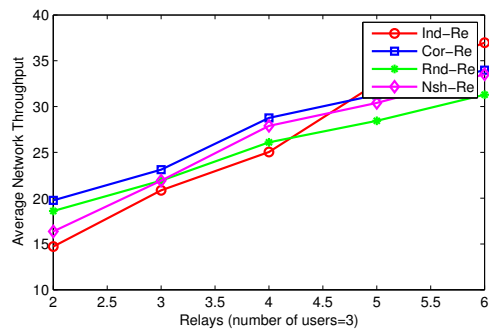


Abbildung 2.12: Durchschnittlichen Daten Durchsatz den Nutzern, wo Anzahl der Nutzern verändert sich nicht, jedoch Anzahl den Relais steigt an.

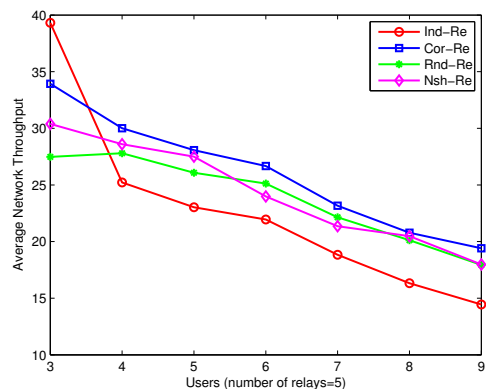


Abbildung 2.13: Durchschnittlichen Daten Durchsatz den Nutzern, wo Anzahl der Relais fixiert ist, jedoch Anzahl den Nutzern sich ändert.

chenden Links in der ersten Phase ist. Das kann beispielsweise der Fall sein, wenn sich eine Relaisstation in der Nähe von Mobilfunknutzern befinden, während die Entfernung zwischen der Basisstation und der Relaisstation relativ groß ist.

Die Hauptmerkmale des Verfahrens können wie folgt zusammengefasst werden: in der ersten Phase werden die Sendeleistung der Basisstation und die an der Basisstation verfügbaren Unterträger so allokiert, dass der Gesamt-Durchsatz zu den ausgewählten Relaisstationen maximiert wird und bestimmte Fairness-Bedingungen erfüllt sind. Das wird durch die Lösung eines entsprechenden Optimierungsproblems erreicht. Die Übertragung der Daten von den Relaisstationen zu den entsprechenden Empfängern erfolgt unter Verwendung von orthogonalen Zugriffsverfahren (TDMA und OFDMA). Das Problem der Auswahl von Relaisstationen und der Bestimmung der Sendeleistungen wird mittels des in der Spieltheorie bekannten Angebot-Nachfrage-Spiels formuliert. In diesem Spiel ist jede Relaisstation ein Verkäufer, der der Basisstation seinen Preis für eine bestimmte Einheit seiner Sendeleistung mitteilt. Der Preis hängt von der Qualität des Kanals von



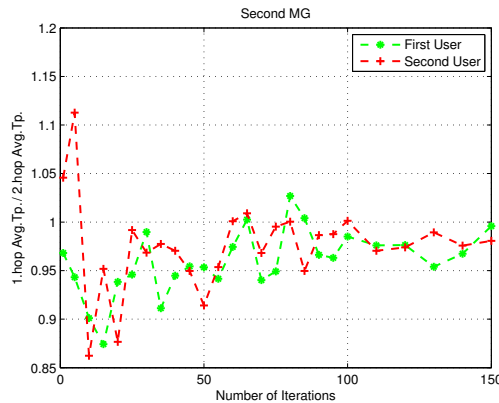


Abbildung 2.14: Durchschnittliche Daten Durchsatz der ersten und zweiten Phasen für die Nutzern des erstes Multicast-Gruppe

der Relaisstation zum Empfänger ab. Die Basisstation agiert als Käufer, der, basierend auf der Ratenallokation in der ersten Phasen und den mitgeteilten Preisen, die Relaisstationen auswählt und die Sendeleistungen fordert, um die Datenraten in beiden Phasen auszugleichen. Der Hauptvorteil dieses Verfahrens liegt vor allem darin, dass nur wenig Feedback-Information von den Relaisstationen zur Basisstation gesendet werden muss.

In der numerische Analyse, werden zwei Multicast-Gruppen mit je zwei und drei Benutzern betrachtet. Abbildung 2.14 zeigt den durchschnittliche Daten Durchsatz der ersten und zweiten Phasen für die Nutzern des erstes Multicast-Gruppe. Das Verhältnis der Durchsätze in der ersten und zweiten Phase konvergiert gegen eins. Das bedeutet, dass die mittleren Durchsätze der beiden Phasen fast gleich sind (wie gewünscht). Darüber hinaus, bedeutet es Fairness bei den Nutzern. Abbildung 2.15 zeigt die Relation zwischen den durchschnittlichen Durchsätzen von der ersten und der zweiten Multicast-Gruppe. Dieses Ergebnis bestätigt die Fairness zwischen den beiden Multicast-Gruppen.

## AP5: Multicast

**Ziele:** Es sollten MIMO/MISO Mehrgruppen-Multicast Kommunikationszenarien analysiert und effiziente Send-, Empfangsalgorithmen, unter Berücksichtigung gegebener senderseitiger Leistungsbeschränkungen und Quality of Service Ansprüchen der einzelnen mobilen Teilnehmer, entwickelt werden. Verknüpfung der Multicast-Übertragung mit der ratenlosen Kodierung sollte betrachtet und nach möglichen Synergieeffekten gesucht werden, die sich positiv auf die Effizienz des Kommunikationsnetzes auswirken.

### Erreichbare SNR-Region im Multicast mit 2 Nutzern

Die Übertragung im Downlink beinhaltet auch die Multicast-Kommunikation. Bei diesem Szenario soll ein mit mehreren Antennenelementen ausgestatteter Sender gleiche Datenpakete zu mehreren Relaisstationen übertragen, wobei die Relaisstationen über eine oder

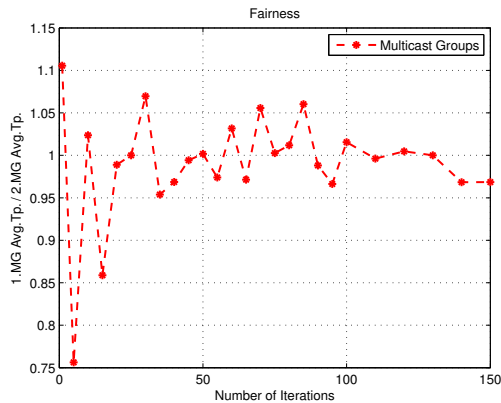


Abbildung 2.15: Relation zwischen dem durchschnittlichen Durchsätzen von der ersten und der zweiten Multicast-Gruppen

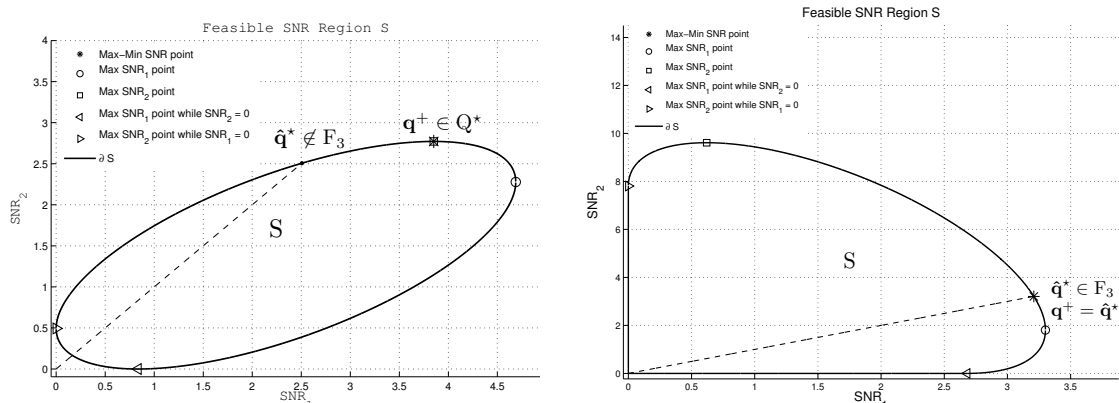
mehrere Antennen verfügen. Die Relaisstationen bilden damit eine Multicast-Gruppe. Es wird angenommen, dass der Sender alle Kanäle vollständig kennt.

Die Optimierung des Sendebestrahmungs-Vektors für die Multicast-Kommunikation ist im Allgemeinen ein NP-schweres Problem. Für die Entwicklung von guten heuristischen Strategien ist es sehr hilfreich, die sogenannte SNR-Region vollständig zu charakterisieren; diese Region ist definiert als die Menge aller SNR-Werte, die mit einer geeigneten Wahl des Sendebestrahmungs-Vektors erreicht werden kann. In [TS10] wurden zuerst die SNR-Regionen für den Fall von nur zwei und drei Nutzern vollständig charakterisiert. Basierend auf diesen Resultaten wurde weiterhin gezeigt unter welchen Bedingungen das Max-Min-Problem durch die Maximierung einer gewichteten Summe von SNRs gelöst werden kann und vor allem, wie man dabei die Gewichte wählen sollte. Der Vorteil des letzten Ansatzes ist, dass sich das Problem der Maximierung einer gewichteten Summe mit einfachen Methoden der linearen Algebra lösen lässt.

Die Charakterisierung zeigt, dass die SNR-Regionen für 2 Multicast-Nutzer ellipsenförmig sind, wobei die Parameter der Ellipse von der Kanalstruktur abhängt. Die Anzahl der Sendantennen hingegen entscheidet darüber, ob die Punkte “unterhalb” der Ellipse, d.h. zwischen der Ellipse und den Achsen, auch zur Region gehören. Beispiele zweier SNR-Regionen für den Fall von  $N_T = 2$  und  $N_T > 2$  werden in Abb. 2.16 dargestellt.

### Effiziente Beamforming-Algorithmen für Multicast mit Kodierung auf der Anwendungsschicht

Im Rahmen dieses Arbeitspaketes wurden auch algorithmische Lösungen für das Beamforming-Problem im Multicast-Szenario mit Kodierung auf der Anwendungsschicht entwickelt. Der erste vorgeschlagene Ansatz (Subset Selection, SS) basiert auf einer intelligenten Suche nach einer guten Untermenge aller Nutzer. Für die gewählte Untermenge wird der Sendebestrahmungs-Vektor mit Hilfe des Max-Min-Beamforming-Algorithmus bestimmt. Der zweite Ansatz (Modified Lozano’s Algorithm, ML) hingegen ergibt einen heuristi-



(a)  $N_T = 2$  Sendeantennen. Max-min-fair Punkt ist auch der Max-SNR Punkt für Nutzer 2.

(b)  $N_T > 2$  Sendeantennen. Max-min-fair Punkt maximiert die gewichtete Summe der SNRs.

Abbildung 2.16: Beispiele erreichbarer SNR-Region mit 2 Multicastnutzern.

sehen, iterativen Algorithmus. In jedem Schritt werden Nutzer betrachtet, deren SNR die Übertragungsrate potenziell bestimmen wird, und mittels Gradienten-Methode wird das SNR dieser Nutzer verbessert. Der Beamforming-Vektor mit der besten Performanz unter den erwägten Möglichkeiten wird dann in die nächste Iteration übernommen. Die Performanz der beiden Ansätze im Vergleich zu herkömmlichen Multicast (nach dem Maxmin-Prinzip) ist ersichtlich aus der Abbildung 2.17. Der SS-Algorithmus hat eine etwas bessere Performanz als der ML-Ansatz, allerdings bei einer höheren Rechenkomplexität. Die beiden Ansätze der kodierten Multicast-Übertragung sind jedoch deutlich besser als der herkömmliche Maxmin-Ansatz, insbesondere für eine höhere Anzahl an Nutzern.

In der Arbeit [KPS12] wird das Konzept der Multicast-Übertragung mit Kodierung auf der Anwendungsschicht weiter ausgearbeitet, indem es auf mehrere Multicast-Gruppen (Engl. *multigroup multicast*) erweitert wird. Der entscheidende Unterschied zum vorher betrachteten Szenario mit einer Multicast-Gruppe besteht in der nun vorhandenen Interferenz im System.

Das Performanzmaß innerhalb einer Gruppe ist die mittlere effektive Datenrate. Als globales Optimierungsziel (über die Gruppen hinweg) können zum Beispiel die Maximierung der minimalen Rate im System oder die Erfüllung bestimmter (mittleren) Ratenanforderungen mit minimaler Sendeleistung betrachtet werden. Die Arbeit [KPS12] konzentriert sich auf die Maximierung einer gewichteten Summenrate und zeigt zum Beispiel, dass die optimalen Beamformingvektoren nur von aktuellen Kanalzuständen abhängen.

Im zweiten Teil der Arbeit werden Algorithmen für das Beamforming-Problem im Multigroup-Multicast vorgeschlagen. Es konnte gezeigt werden, dass unter bestimmten Voraussetzungen das Beamforming-Problem ein konvexes Problem ist. Der Ausgangspunkt ist der Leistungsallokationsalgorithmus, der mit Hilfe eines Subgradienten-Ansatzes

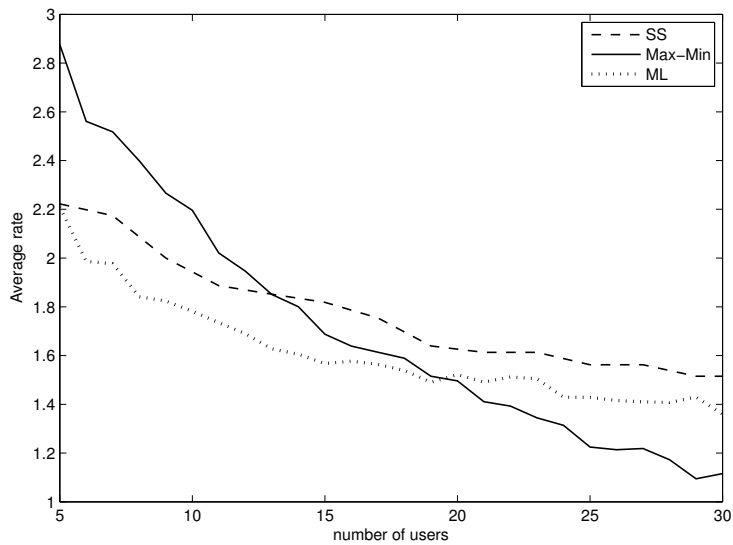


Abbildung 2.17: Mittlere Rate nach  $T = 100$  gesendeten Blöcken.

auf den Fall mehrerer Multicast-Gruppen verallgemeinert wird. Aufbauend darauf werden heuristische Algorithmen für eine gemeinsame Optimierung der Leistungsallokation mit Beamformingvektoren vorgeschlagen; dabei wird sowohl der Fall mit einer zusätzlichen Kodierung auf der Anwendungsschicht als auch der Fall ohne Kodierung betrachtet.

Darüber hinaus ist die Multicast-Übertragung Bestandteil der in den Arbeiten [MS11], [MS12a] und [MKS12] betrachteten Szenarien. Die wichtigsten Ergebnisse werden in den Beschreibungen der Arbeitspakete AP4, AP6 und AP8 zusammengefasst. Ferner ist die Multicast-Übertragung ein wichtiger Bestandteil der Simulationsumgebung, die entwickelt wurde um die Performanz unterschiedlicher Strategien und Algorithmen für das Projektszenario numerisch zu evaluieren. Multicast wird hauptsächlich in der ersten Phase eingesetzt, um die Daten von einer Basisstation an mehrere Relais zu verteilen.

### AP6: Netzkodierung

**Ziele:** In diesem Arbeitspaket sollten skalierbare und robuste Netz-Kodierungsverfahren niedriger Komplexität für drahtlose Kommunikationsnetze unter Berücksichtigung realer Randbedingungen (Kanalschwund, mögliche Interferenz, veränderliche Netztopologie usw.) entwickelt werden. Ferner sollten unterschiedliche Übertragungsmodi (Multicast- und Unicast-Übertragungen) betrachtet werden.

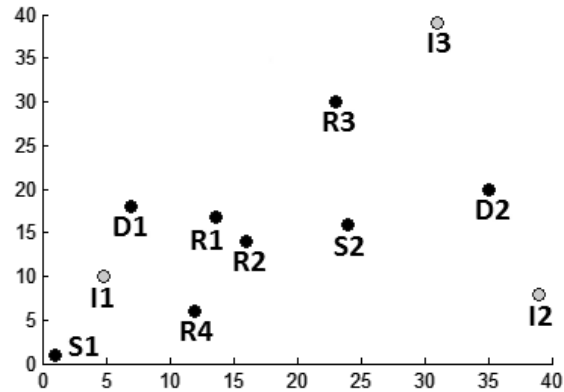
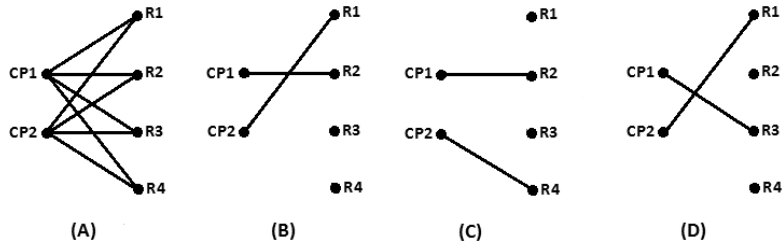


Abbildung 2.18: Netz-topologie (S: Quelle, D: Ziel, IP: Interferenz). Jede Quelle-Ziel-Paar bildet eine Kommunikation Paar (CP).

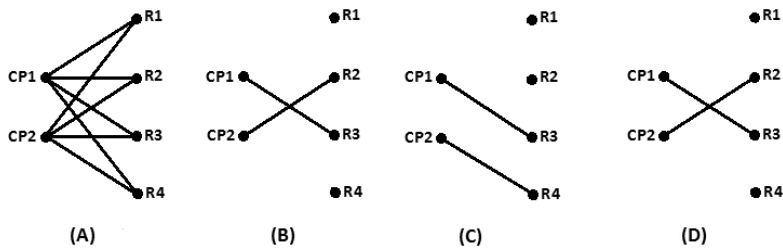
### Protokoll Design und Effiziente Clustering und Relais-Auswahl für Netzkodierung und ratenlosen Kodierung

In der Arbeit [MS12b] wird ein Verfahren zu Leistungsallokation und Relais-Selektion für netzkodierte Mobilfunknetze entwickelt und analysiert. Damit adressiert die Arbeit eine der Hauptfragestellungen des Projektes, nämlich das Problem der Ressourcenallokation in relaisgestützten Mobilfunknetzen unter Verwendung von Netzkodierung für die bidirektionale Weitergabe (bidirectional relaying). Das betrachtete Szenario beinhaltet eine feste Anzahl von Nutzern, die ihre Daten über eine Menge von Relaisstationen austauschen. Die Daten werden an Relaisstationen mit Hilfe der Netzkodierung kodiert. Die Optimierung der Leistungsallokation zielt auf die Minimierung der Sendeleistungen bei gleichzeitigem Einhalten von vorgegebenen QoS-Anforderungen ab. Das Problem der Relais-Selektion wird dagegen als gewichtetes Matching-Problem formuliert und zielt auf die Minimierung einer Kostenfunktion (zum Beispiel Sendeleistungen oder mittlere Latenzzeit) oder die Maximierung einer Nutzenfunktion (zum Beispiel Datendurchsatz) ab. Die Optimierung der Leistungsallokation zielt auf die Minimierung der Sendeleistungen bei gleichzeitigem Einhalten von vorgegebenen QoS-Anforderungen ab. Das Problem der Relais-Selektion wird dagegen als gewichtetes Matching-Problem formuliert und zielt auf die Minimierung einer Kostenfunktion (zum Beispiel Sendeleistungen oder mittlere Latenzzeit) oder die Maximierung einer Nutzenfunktion (zum Beispiel Datendurchsatz) ab. Das von uns entwickelte Verfahren benötigt lediglich statistische Kanalinformationen, was den Feedback-Overhead deutlich reduziert. Genauer gesagt, betrachten wir eine Utility Funktion, Goodput, und zwei kosten Funktionen, nämlich erwartete Sendezeit (Expected Transmission Time, ETT) und durchschnittliche verschwendete Leistung (Average Wasted Power, AWP).

Das Netzwerk-Modell zur numerischen Analyse ist in Abbildung 2.18 dargestellt. Abbildungen 2.19, 2.20 und 2.21 zeigen die ausgewählten Relais für die drei oben- genannten Netz-Funktionen. Es ist klar, dass die ausgewählten Relais mit unterschiedlichen Performanz-Metriken ändern.



Abbildungung 2.19: Die optimale Relais-Auswahl basiert auf der erwarteten Sendezeit (ETT): (A) Zwei-partiten Graphen Modell des Systems. Es ist eine Edge zwischen einem CP (in der ersten Partei) und ein Relais (in der zweiten Partei), nur wenn das Relais verfügbar ist. (B), (C) und (D): Die optimale Relais-Auswahl für verschiedene Szenarien in Bezug auf die durchschnittliche Kanal Gewinne und Standorten von Relais.



Abbildungung 2.20: Die optimale Relais-Auswahl basiert auf durchschnittliche verschwendete Leistung (AWP).

Die Arbeit [MS12c] ist im gewissen Sinne die Fortsetzung und Erweiterung der Arbeit [MS12b]. Im Gegensatz zu dieser Arbeit werden in [MS12c] kleinere Gruppen von Sendern und Relaisstationen gebildet, wobei die Mitglieder einer Gruppe (eines Clusters) bei der Übertragung kooperieren, um die Diversitätsordnung zu erhöhen und die Latenzzeit zu reduzieren. Die Latenzzeit ist ein wichtiger Parameter, weil die Daten vor der Übertragung mit Hilfe der ratenlosen Kodierung in der ersten Phase sowie der Netzkodierung und ratenlosen Kodierung in der zweiten Phase kodiert werden. Die Aufgabe besteht nun darin, die Sender und Relaisstationen so zu gruppieren, dass die mittlere Latenzzeit unter bestimmten Bedingungen/Annahmen minimiert wird. Das Optimierungsproblem ist ein kombinatorisches Problem und wird ähnlich [MS12b] auf ein Minimum-Matching-Problem in gewichteten bipartiten Graphen zurückgeführt. Für numerische Analyse, betrachten wir ein System-Modell ähnlich dem in [MS12b], wie in Abbildung 2.22 dargestellt ist. Abbildung 2.23 zeigt das Clustering und Assigniert von Relais und Sender Clustern. Nähere Informationen und die Algorithmen können in [MS12c] gefunden werden.

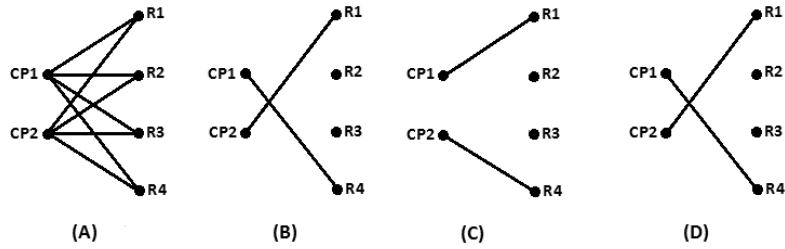


Abbildung 2.21: Die optimale Relais-Auswahl basiert auf Goodput

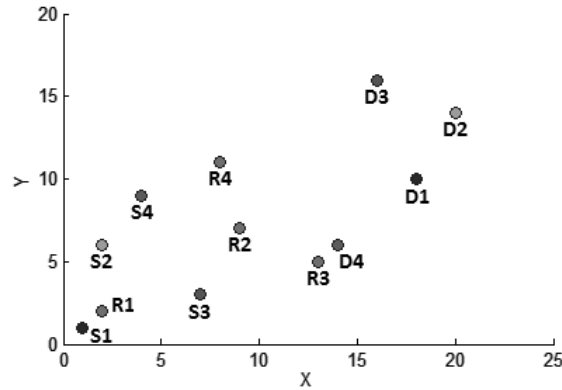


Abbildung 2.22: Netz-topologie (S: Quelle, D: Ziel). Jede Quelle-Ziel-Paar bildet eine Kommunikation Paar (CP).

### Optimierungsframework für Netzwerke mit intra-flow Netzkodierung

Darüber hinaus wurde im Rahmen des Arbeitspakets AP6: Netzkodierung ein Schema analysiert, in dem intra-flow Netzkodierung (Kodierung innerhalb eines Datenflusses) vorgenommen wird. Das Ziel der Arbeiten war das Bereitstellen eines Optimierungs-Frameworks, das unterschiedliche Zielfunktionen unterstützt. Das zu erwartende Ergebnis ist eine Netzwerk-Konfiguration, die zum Optimum im Sinne der gewünschten Zielfunktion führt, z.B. zur höchsten Übertragungsrate, unter der Bedingung, dass die Relay-Knoten über beschränkte Energie-Ressourcen verfügen. Die ersten Resultate wurden in [KS10] präsentiert. In dieser Arbeit wird allerdings ein allgemeineres Multihop-Szenario betrachtet und zuerst nur ein Informationsfluss angenommen, so dass keine Interferenz im Netz betrachtet wird. Die zugrunde liegenden Kanäle sind einfache Auslöschungskanäle, eine Annahme, die beim Entwurf von Netzcodes durchaus üblich ist. Das Ziel ist die Maximierung der Lebenszeit eines Netzes, was auf ein Max-Min-Optimierungsproblem führt. Die unteren Schichten des Protokollstapels können durch die Anwendung des in [GS11] angenommenen Ratenmodells einbezogen werden.

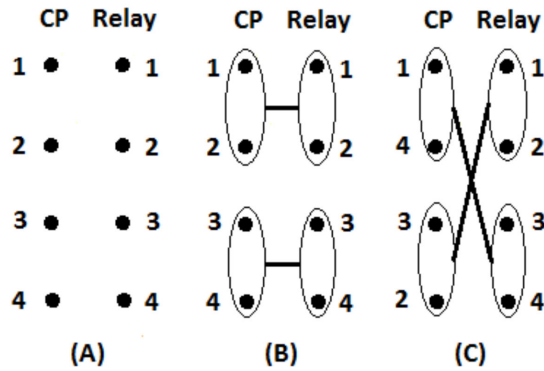


Abbildung 2.23: (A) Zwei-partiten Graphen Modell des Systems. (B) Eine mögliche Clustering-Assignment. (C) Optimale Clustering-Assignment.

### AP7: Ratenlose Kodierung

**Ziele:** Das Ziel dieses Arbeitspaketes bestand darin die Anwendungsmöglichkeiten von ratenloser Kodierung zu untersuchen und, unter Berücksichtigung von Übertragungsstrategien und veränderlicher Netztopologie, effiziente und robuste Kodierungsstrategien zu entwickeln. Zudem sollten die für die Informationssicherheit relevanten Eigenschaften der ratenlosen Kodierung betrachtet werden. Darauf basierend sollten Ideen und Schemata für (informationstheoretisch-) sichere Übertragungen entwickelt werden.

#### Protokoll Design und Effiziente Auswahl von diskreten Ressourcen (Relais)

Die Vorteile der ratenlosen Kodierung liegen auf der Hand: einfacheres Management bei einer Übertragung zu mehreren Empfängern und keine perfekte Linkadaptation erforderlich, weil Sendewiederholungen nicht notwendig sind; daher wird beim Senden weniger Kanalzustandsinformation erforderlich als in klassischen Mobilfunknetzen, in denen der Linkadaptation eine entscheidende Rolle zukommt, um die Übertragungsfehler und die damit verbundenen Sendewiederholungen zu vermeiden. Der Hauptnachteil der ratenlosen Kodierung besteht darin, dass der Durchsatz und damit auch die Latenzzeit bei der Übertragung stark von Kanaleigenschaften beeinflusst werden. Um dem Nachteil zu begegnen, wird in der Arbeit [MS12a] ein Protokoll für die Auswahl und Zuweisung von Relaisstationen zu Empfängern in einem relaisgestützten Mobilfunknetz vorgeschlagen und untersucht; mit diesem Protokoll wird die Fehlerwahrscheinlichkeit bei der Übertragung unter der Annahme einer konstanten Senderate kontrolliert, so dass bestimmte Anforderungen bezüglich der Latenzzeit erfüllt sind. Die Übertragung besteht aus zwei Phasen, wobei die für einen Empfänger bestimmten Daten zu mehreren Relaisstationen gesendet werden können; diese Relaisstationen kooperieren während der Übertragung zu dem gewünschten Empfänger in der zweiten Phase. Der Zusammenhang zur Latenzzeit wird klar, wenn man bedenkt, dass der Durchsatz gleich dem Produkt der Senderate und der Fehlerwahrscheinlichkeit ist. Das entwickelte Protokoll nutzt eine Reihe von Resultaten zur ratenlosen Kodierung, um eine vorgegebene Latenzzeit durch eine ent-



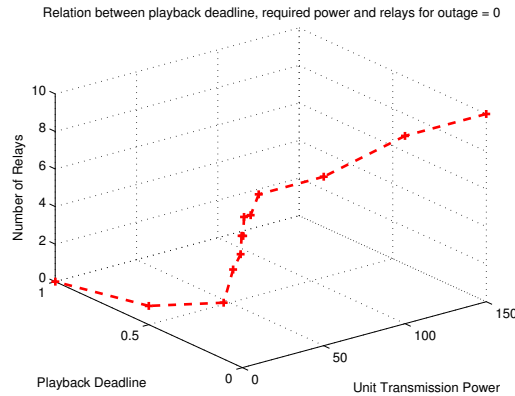


Abbildung 2.24: Beziehung zwischen der Sendeleistung, Latenzzeit und Anzahl der Relais für null Ausfall

sprechende Selektion von Relaisstationen im Mittel zu erfüllen (vorausgesetzt, dass diese Anforderungen mit den vorhandenen Ressourcen und Relaisstationen erreichbar sind). Es wird davon ausgegangen, dass die Fehlerwahrscheinlichkeit mit dem SNR reduziert wird und dass SNR-Werte am Ausgang eines Empfängers mit der Anzahl der kooperierenden Relaisstationen steigt. Das Protokoll bestimmt die Kooperationsgruppen iterativ, bis die gewünschte erwartete Latenzzeit erreicht ist. Neben einer effizienteren Ausnutzung der Ressourcen zeichnet sich das Protokoll vor allem durch ein relativ kleines Feedback-Overhead aus.

In der numerischen Analysen, betrachten wir ein Netzwerk mit einem Nutzer, einem Interferenz Signal (mit der Hälfte der Leistung des Nutzers), und 15 Relais. In Abbildung 2.24 zeigen wir die Beziehung zwischen der Sendeleistung und der Latenzzeit (engl. Playback Deadline), und die Anzahl der Relais um keine Fehler bei der Übertragung zu machen. Abbildung 2.25 zeigt die Beziehung zwischen der Sendeleistung und Latenzzeit so dass die Fehlerrate null beträgt. Darüber hinaus zeigt Abbildung 2.26 die Anzahl der Fehler als einen Funktion der Sendeleistung für verschiedene Latenzzeiten.

Ferner wurde als vorbereitende Arbeit im AP7 wurde eine Implementierung von ratenloser Kodierung für den Auslöschungskanal durchgeführt. Die Implementierung stellt eine Abbildung der Übertragungsstrecke dar, in der LT-Codes oder Raptor Codes auf der Anwendungsschicht benutzt werden. Die Implementierung entstand im Rahmen einer Diplomarbeit (s. auch Zwischenbericht 2010), war eine Grundlage für weitere Arbeiten auf dem Gebiet und wurde für die Auswertung unterschiedlicher Konzepte benutzt.

Darüber hinaus wurde der Einsatz von ratenloser Kodierung in unterschiedlichen Szenarien untersucht. In [KPS11, KPS12] wird ein ratenloser Code für die Anwendungsschicht in der ersten Phase (d.h. die Übertragung von der Quelle zu den Relaisstationen) verwendet. Die Ergebnisse zu der sich daraus ergebenden Kapazität der kodierten Multicast-Übertragung werden detailliert im A52: Performanzgrenzen und AP5: Multicast diskutiert. Das zweite betrachtete Szenario sieht den Einsatz von ratenloser Kodie-

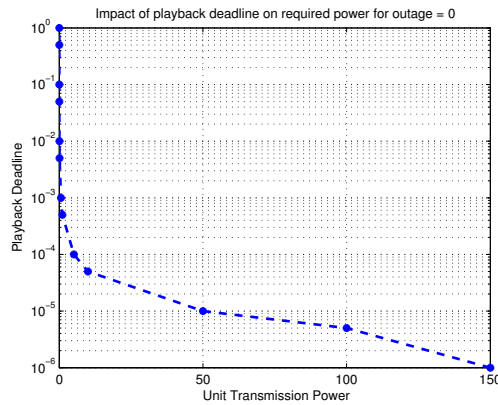


Abbildung 2.25: Beziehung zwischen der Sendeleistung und Latenzzeit für null Ausfall

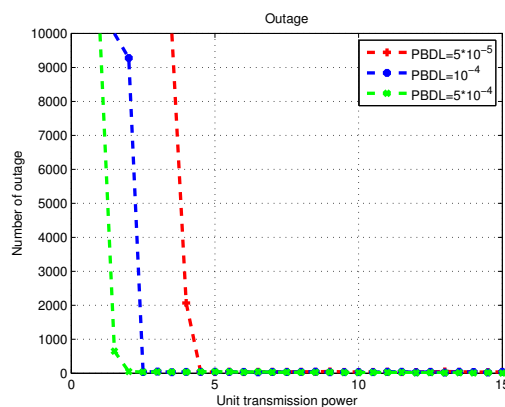


Abbildung 2.26: Anzahl der Ausfälle als einen Funktion der Sendeleistung für verschiedene Latenzzeiten (PBDL)

zung in der kooperativen Uplink-Übertragung vor [MS12c]. Dadurch entsteht ein Schema, in dem die zusammenarbeitenden Basisstationen nur die empfangenen Datenpakete austauschen (und nicht die Abtastwerte der physikalischen Schicht). Der entscheidende Vorteil des ratenlosen Codes besteht auch darin, dass es ausreichend ist, einen einzigen Code zu verwenden, unabhängig von der Kanalqualität. Die Beschreibung des analysierten Schemas befindet sich im AP3: Relaying und kooperative Diversität.

### AP8: Informationssicherheit

**Ziele:** In diesem Arbeitspaket sollte der Aspekt der Informationssicherheit in den betrachteten Übertragungs- und Kodierungsstrategien explizit berücksichtigt werden. Um die Datensicherheit im informationstheoretischen Sinne zu gewährleisten, sollten Konzepte und Schemata entwickelt werden, die verhindern, dass potenzielle Lauscher genügend

Daten bzw. ein ausreichend starkes Signal empfangen, um die ursprüngliche Nachricht rekonstruieren (dekodieren) zu können. Für diesen Zweck sollten insbesondere ratenlose Codes und Ressourcenallokation mit (kooperativen) Mehrantennentechniken eingesetzt werden.

### Sicherheits-Kapazität von Multicast mit mehreren Antennen und mehreren Abhörern

Das im Rahmen dieser Arbeiten betrachtete Multicast-Szenario besteht aus einer mit mehreren Sendeantennen ausgestatteten Basisstation, mehreren legitimen Nutzern (Empfängern) sowie einigen nicht legitimen Nutzern (Abhörern). Die Basisstation verfügt über volle Kenntnis über den Kanalzustand und ist in der Lage, ihren Sendefilter (*eng. transmit beamformer*) geeignet zu wählen. Das Ziel dabei ist eine sichere Multicast-Übertragung, bei der alle legitimen Nutzer die Übertragung fehlerfrei dekodieren können, ohne dass sie aber von den Abhörern empfangen wird. Da das oben genannte Optimierungsproblem nur approximativ mit Hilfe von numerischen Werkzeugen gelöst werden kann, ist die direkte Analyse der erreichbaren Rate der sicheren Übertragung unmöglich. Die Fragestellung in den 2011 angefangenen und 2012 weitergeführten Arbeiten (veröffentlicht in [MKS12]) war deswegen die Analyse des asymptotischen Verhaltens der erreichbaren Rate, wenn verschiedene Systemparameter über alle Grenzen wachsen. Die erreichbare Rate  $R_{\text{sc}}$  hängt vom momentanen Kanalzustand ab und kann wie folgt ausgedrückt werden:

$$R_{\text{sc}} = \max(0, \tilde{R}_{\text{sc}})$$

wobei  $\tilde{R}_{\text{sc}}$  gegeben wird durch:

$$\tilde{R}_{\text{sc}} \triangleq \log \left( \max_{\substack{\text{Tr}(\mathbf{\Sigma})=1 \\ \mathbf{\Sigma} \succeq 0}} \min_{i,j} \frac{1 + \mathbf{h}_i^H \mathbf{\Sigma} \mathbf{h}_i}{1 + \mathbf{g}_j^H \mathbf{\Sigma} \mathbf{g}_j} \right).$$

Hier bezeichnen  $\mathbf{h}_i^H$  und  $\mathbf{g}_j^H$  die Kanalvektoren für die legitimen Nutzer und für die Abhörer, und  $\mathbf{\Sigma}$  die Sendekovarianzmatrix, über die optimiert wird. Um die Analyse durchführen zu können, wurden zuerst unterschiedliche untere und obere Schranken für die erreichbare Rate eingeführt, die nur vom jeweiligen Kanalzustand abhängen und keine Optimierung mehr erfordern. Anschließend wurden die Schranken eingesetzt, um Skalierungsgesetze der erwarteten erreichbaren Rate herzuleiten, wobei sich der Erwartungswert  $\mathbb{E}[R_{\text{sc}}]$  auf die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Kanäle bezieht. Mit Hilfe der eingeführten Schranken untersuchen wir die Skalierung von  $\mathbb{E}[\tilde{R}_{\text{sc}}]$ , wobei  $\max(\mathbb{E}[\tilde{R}_{\text{sc}}], 0)$  eine untere Schranke für die tatsächliche Rate der sicheren Übertragung  $\mathbb{E}[R_{\text{sc}}]$  darstellt. Die wichtigsten Erkenntnisse sind ( $N$ -Anzahl der legitimen Nutzer,  $M$ -Anzahl der Abhörer,  $L$ -Anzahl der Antennen):

- Für feste  $M, L$  und mit  $N \rightarrow \infty$ , eine untere Schranke für  $\mathbb{E}[\tilde{R}_{\text{sc}}]$  hat die Form  $c_1 \left(\frac{1}{N}\right)^{\frac{1}{L}} - c_2$ , mit geeigneten Konstanten  $c_1, c_2 > 0$ , und skaliert somit wie  $\Omega(1)$ .
- Für feste  $N, L$  und mit  $M \rightarrow \infty$ ,  $\mathbb{E}[\tilde{R}_{\text{sc}}]$  skaliert wie  $\Omega(\log(\log M)^{-1})$ .

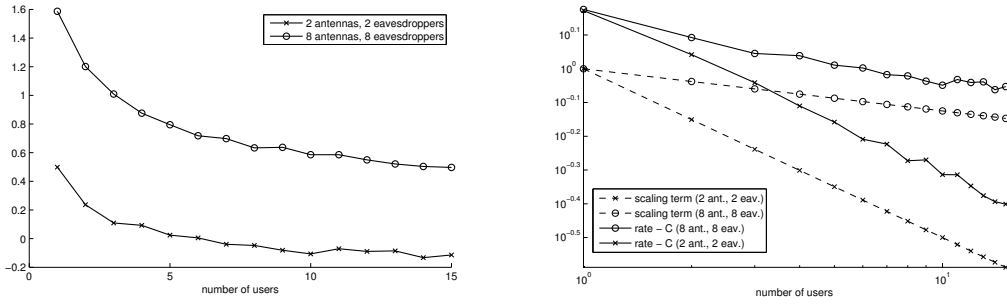


Abbildung 2.27: Skalierung von  $\tilde{R}_{sc}$  als Funktion der Anzahl der legitimen Nutzer. Links: lineare Darstellung. Rechts:  $\tilde{R}_{sc} - C$  in doppel-logarithmischer Darstellung, samt Skalierungstermen.

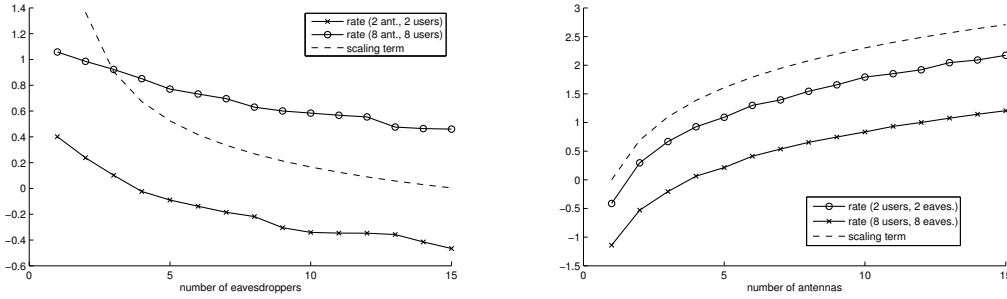


Abbildung 2.28: Skalierung von  $\tilde{R}_{sc}$  als Funktion der Anzahl der Abhörer (links) und der Anzahl der Antennen (rechts), samt Skalierungstermen.

- Für feste  $M, N$  und mit  $L \rightarrow \infty$ ,  $\mathbb{E}[\tilde{R}_{sc}]$  skaliert wie  $O(\log L)$ .

Die obigen Ergebnisse werden in Abb. 2.27 und 2.28 bildlich dargestellt. Weiterhin wurde die Ausfallwahrscheinlichkeit im System untersucht, also die Wahrscheinlichkeit, dass eine zufällige Kanalrealisierung keine sichere Übertragung mit positiver Rate ermöglicht. In einigen Spezialfällen wurde die Ausfallwahrscheinlichkeit analytisch bestimmt, es wurden auch obere und untere Schranken vorgeschlagen.

### Informationstheoretische Sicherheit im Bidirektionalen Relais-Kanal

Im Rahmen des FundNet-Projektes haben wir den bidirektionalen Relais-Kanal verstärkt auch unter Aspekten der informationstheoretischen Sicherheit untersucht. Wir unterscheiden interne und externe Sicherheit. Interne Sicherheit bedeutet, dass Sicherheit innerhalb des Systems gewährleistet werden soll. Von externer Sicherheit sprechen wir wenn das System gegen einen externen Abhörer, der nicht zum System gehört, gesichert werden soll. Im Folgenden fassen wir unsere Ergebnisse kurz zusammen.

In der Arbeit [WB12] wird ein bidirektionaler Relais-Kanal betrachtet, wobei in der BBC-Phase eine zusätzliche geheime Nachricht an einen der beiden Empfänger gesendet werden muss. In der Arbeit wurde die Sicherheits-Kapazitäts-Region der BBC-Phase mit zusätzlicher geheimer Nachricht bestimmt. In [WWB11, MWB13] wurde ebenfalls der bidirektionale Relais-Kanal mit zusätzlicher geheimer Nachricht betrachtet. Im Gegensatz zur vorangegangenen Arbeit wurde hier jedoch das Konzept der *starken Sicherheit* verwendet. Das Konzept der starken Sicherheit besagt, dass die mittlere Dekodierfehlerwahrscheinlichkeit an nicht-legitimen Empfängern gegen eins gehen muss. In der Arbeit wurde die Kapazitäts-Region des bidirektionalen Relais-Kanals mit einer zusätzlichen geheimen Nachricht unter starker Sicherheit bestimmt.

In [WB11b] wurden die Arbeiten erweitert, so dass das Relais zusätzlich noch eine gemeinsame und eine geheime Nachricht überträgt. Der Fokus der Arbeit liegt auf der Broadcast-Phase, in der das Relais die beiden individuellen Nachrichten, eine zusätzliche gemeinsame Nachricht und eine zusätzliche geheime Nachricht übertragen muss. In der Arbeit wurde die Sicherheits-Kapazitäts-Region bestimmt. In [WB11a] wurden die Ergebnisse zum BBC mit zusätzlicher gemeinsamer und geheimer Nachricht auf den Fall, wo die Netzwerk-Knoten mehrere Antennen haben, erweitert. In der Arbeit [WSB11] haben wir ein Szenario mit einem externen Abhörer untersucht. In der Arbeit wurden erreichbare Raten-Regionen sowie eine äußere Schranke der Sicherheits-Kapazitäts-Region gefunden.

### **Schichtübergreifende Sicherheit bei Relais die nicht vertrauenswürdig sind**

Die zentrale Fragestellung der Arbeit [KMS13] bestand darin, wie man in einem Relais-Netzwerk eine sichere Übertragung von der Basisstation zum Endnutzer implementieren kann. Auf der einen Seite spielen die Relais in einem solchen Netzwerk die Schlüsselrolle, ermöglichen große Performanzgewinne im Vergleich zu der direkten Übertragung zwischen der Basisstation und dem Endnutzer, bzw. machen die Ende-zu-Ende-Kommunikation überhaupt möglich wenn der direkte Link zu schwach ist. Auf der anderen Seite es ist eher illusorisch, perfektes Vertrauen in allen teilnehmenden Geräten / Knoten zu haben, denn die Netzwerke können heterogen sein und aus Knoten mehrerer Betreiber bestehen. Auch wenn alle Relais-Knoten das Kommunikationsprotokoll einhalten, können manche von denen am Abhören weitergeleiteter Daten interessiert sein. Wegen dieser Gründe sind die Relais-Knoten im Allgemeinen nicht vertrauenswürdig und die übertragenen Nachrichten sollen für sie nicht dekodierbar sein.

Die Fähigkeit eines Systems, die Nachrichten den Abhörern gegenüber zu schützen, wird im Framework der informationstheoretischen Sicherheit betrachtet. Die sogenannte perfekte informationstheoretische Sicherheit scheint aber im vorliegenden Szenario im Allgemeinen zu streng zu sein, und zusätzlich schließt sie nicht nur den Einsatz von Decode-and-Forward-Strategien aus, sondern führt auch bei anderen Weiterleitungsprinzipien zu erheblichen Performanzeinbußen. Deswegen wurde ein innovatives Konzept der schichtübergreifenden Sicherheit (*eng. cross-layer security*) vorgeschlagen und entwickelt, bei der nur Teile der gesamten Übertragung hinsichtlich eines bestimmten Relais auf der physikalischen Schicht informationstheoretisch sicher sind. Auf einer höheren Schicht

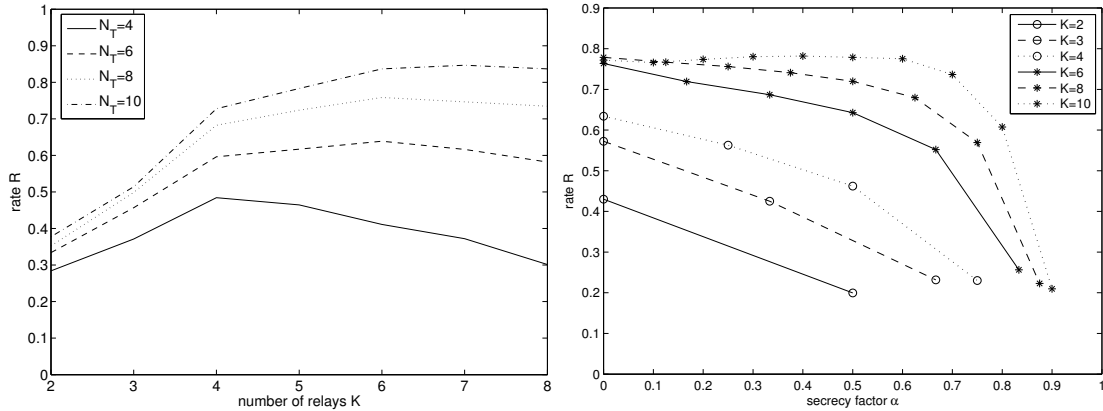


Abbildung 2.29: Rate im DF Mode. Links: PSDF1 mit 0.5-Sicherheit als Funktion der Anzahl von Relays  $K$ . Rechts: PSDF2 als Funktion des Sicherheitsfaktors  $\alpha$ .

sorgt ein weiteres Sicherheitsprotokoll dafür, dass nicht einmal Teile der gesamten Übertragung an einem gegebenen Relais dekodiert werden können.

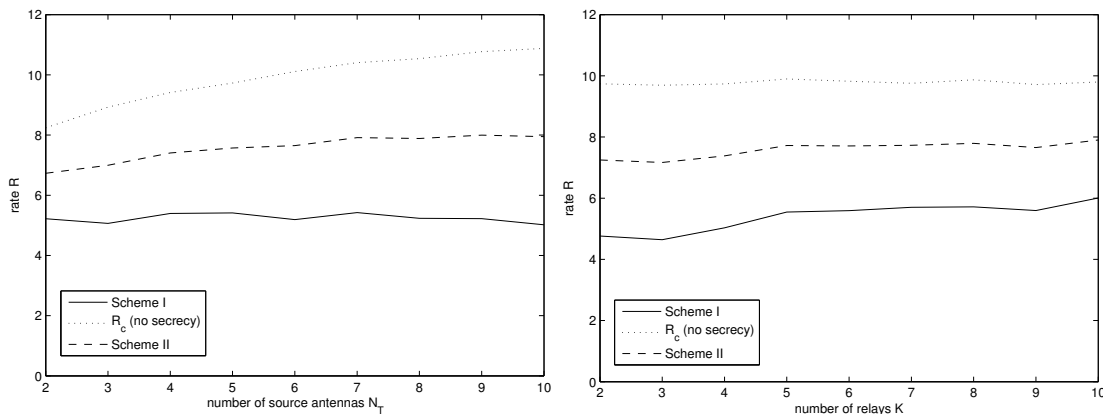


Abbildung 2.30: Rate im AF Mode. Scheme I: perfekte Sicherheit (1-secrecy). Scheme II: 0.5-Sicherheit. Links: als Funktion der Anzahl von Sendeantennen  $N_T$ . Rechts: als Funktion der Anzahl von Relays  $K$ .

Aus Sicht der physikalischen Schicht, generalisiert das vorgeschlagene Konzept die perfekte Abhörsicherheit und ermöglicht ein konfigurierbares Niveau von informationstheoretischen Sicherheit zu erreichen. Es wird der Begriff der  $\alpha$ -secrecy eingeführt, um eine Übertragung zu charakterisieren, bei der mindestens ein  $\alpha$ -Anteil (im Sinne der Übertragungsrate) durch jedes Relais informationstheoretisch perfekt sicher ist und nicht dekodiert werden kann. Im Fokus der Arbeiten lagen Entwurf und Analyse von Übertragungsstrategien für die physikalische Schicht, die eine gewisse  $\alpha$ -secrecy garantieren. Es wurden sowohl Decode-and-Forward (DF) als auch Amplify-and-Forward (AF) Ansätze

betrachtet. Neben der Analyse von grundlegenden Eigenschaften der  $\alpha$ - *secrecy* wurden einige praktische Schemen vorgeschlagen. Ihre Ratenperformanz wird in den Abbildungen 2.29 und 2.30 dargestellt.

## AP9: Auswertung

**Ziele:** In diesem Arbeitspaket sollten die im Projekt entwickelten Verfahren, Methoden und Protokolle numerisch ausgewertet und verifiziert werden.

### Simulationsplattform: NetSim

Im AP9 wurde die Simulationsplattform NetSim entwickelt, im folgenden NetSim-Tool oder Tool genannt.

Das entwickelte Tool ist eine auf Matlab basierte Simulationsplattform. Die modulare Implementierung ermöglicht die Simulation von verschiedenen Netzwerken, sowie den entsprechenden unterschiedlichen Verfahren, Methoden und Protokollen. Die Struktur des NetSim-Tools ist in Abbildung 2.31 zu sehen.

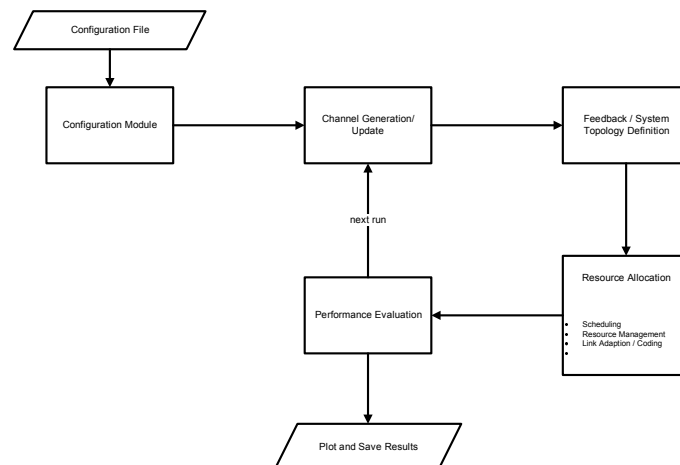


Abbildung 2.31: Struktur des NetSim-Tools. Jedes Modul ist austauschbar, sodass eine Vielzahl von Systemen und Verfahren simuliert werden kann.

Im Projekt wurde das NetSim-Tool hauptsächlich verwendet um two-hop Netzwerke zu untersuchen. Eine genaue Definition der verschiedenen untersuchten Sendestrategien, sowie das betrachtete Systemmodell ist im Jahresbericht 2012 zu finden. Die Ergebnisse der Simulationsstudie lassen sich wie folgt zusammenfassen.

Strategien die Interferenz vermeiden sollten im hohen SNR Bereich, immer bevorzugt werden. Die einfachste interferenzfreie Strategie ist Time-Sharing (TDMA). Abbildung

2.32 vergleicht TDMA mit dem sogenannten Zeroforcing Beamforming. Beim Zeroforcing Beamforming werden die Datenströme durch gezielte Überlagerungen von den Sendesignalen der unterschiedlichen Sendeantennen getrennt. Wir sehen das TDMA bei einem SNR von 5 – 20 dB (je nach Anzahl der Relais) optimal wird.

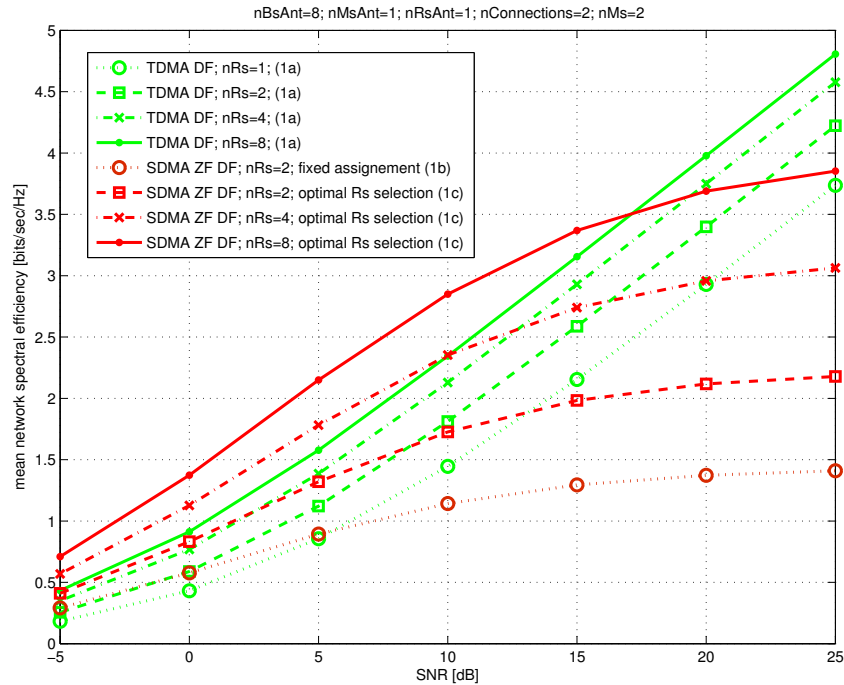


Abbildung 2.32: Gesamtsystem Rate über SNR.

Sollten die Netzwerkknoten mit mehreren Antennen ausgestattet sein können nicht nur Sende-Filter (d.h. Beamforming) sondern auch Empfangs-Filter verwendet werden um die Interferenz zu vermeiden. In diesem Fall können mehrere Datenströme gleichzeitig interferenzfrei auf den gleichen Ressourcen übertragen werden. Abbildung 2.33 vergleicht die Spektrale Effizienz für Systeme mit einer und zwei Sendeantennen.

## 2.2 Die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die wichtigsten Positionen der Schlussabrechnung waren:

- Pos. 0812 (Wissenschaftler): 384.851,76 EUR (Planung 376.405,00 EUR)
- Pos. 0835 (Vergabe von Aufträgen): 54.999,99 EUR (Planung 55.000,00 EUR)
- Pos. 0846 (Reisekosten): 6.700,00 EUR (Planung 6.700,00 EUR)



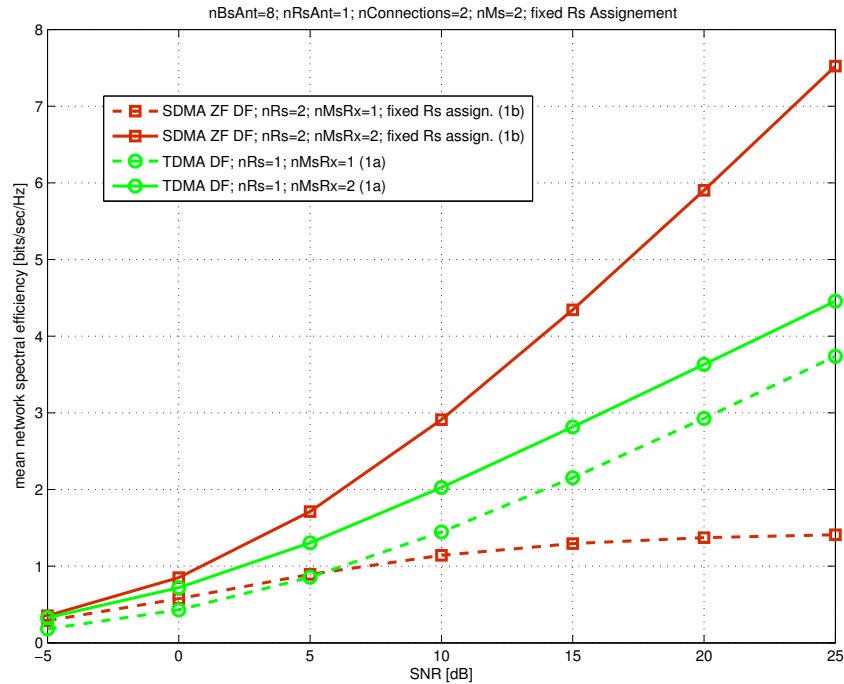


Abbildung 2.33: Gesamtsystem Rate über SNR. Vergleich von Nutzern mit einer und zwei Antennen.

## 2.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeitsleistung, die zum Erzielen der wissenschaftlichen Ergebnisses eingesetzt wurde war notwendig und angemessen.

## 2.4 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertung

Wie bereits in Kapitel 1 erwähnt wurde als direkte Folge des FundNet-Projektes eine Reihe von neuen Kooperationen gestartet, die im Rahmen anderer Forschungsprojekte fortgesetzt werden. Dazu gehört die Kooperation mit der Firma BMW Forschung und Technik GmbH in München, die sich im Auftrag der Firma BMW Group mit der Entwicklung neuer Verfahren für fahrzeuggesteuerte Funkkommunikation im Kontext von Mobilfunknetzen fünfter Generation beschäftigt. Das Ziel dieser Aktivitäten ist es, einerseits die Funkkommunikation zwischen Fahrzeugen sowie Fahrzeugen und der 5G-Mobilfunkinfrastruktur im Hinblick auf die Effizienz und die Zuverlässigkeit zu verbessern, um zum Beispiel neue Dienste und Applikationen für Fahrzeugnutzer zu erschließen; andererseits soll die Möglichkeit untersucht werden, Fahrzeuge als nomadische Relais-Stationen zu nutzen, um die Leistungsfähigkeit künftiger Mobilfunknetze zu steigern. In diesem Zusammenhang lassen sich die folgenden FundNet-Resultate wirtschaftlich ver-

werten:

- Die Nutzung ratenloser Codierung und Kontext-Information<sup>1</sup> zur Steigerung der Handover-Performanz für fahrzeugbasierte Funkkommunikation. Im FundNet-Projekt wurde ein methodisches Know-How auf dem Gebiet ratenloser Codierung und Netzwerkcodierung aufgebaut, das sich wirtschaftlich im Hinblick auf verschiedene Anwendungen verwerten lassen kann. Die Verwertung eines Teils der im FundNet-Projekt entwickelten oder durch das Projekt initiierten Konzepte und Algorithmen findet bereits im Rahmen einer direkten Kooperation zwischen der Firma BMW und dem Fraunhofer HHI statt. Aus dieser Kooperation ist eine Patentanmeldung entstanden; zwei Mitarbeiter der Firma BMW mit der Absicht zur Promotion werden von Herrn Dr. Stanczak wissenschaftlich betreut.
- Ratenlose und Netzwerk-Codierung lässt sich auch zur Bildung von nomadischen Zellen oder virtuellen Zellen einsetzen; virtuelle Zellen können eine Schlüsselrolle bei der Unterstützung hoher Mobilität in dichten Funknetzen spielen. Durch den Einsatz neuer Codierungstechniken soll die Effizienz dieser Netze gesteigert und das Overhead minimiert werden. In diesem Zusammenhang wird es auch geplant, für das im FundNet-Projekt entwickelten Konzept der schichtübergreifenden Sicherheit zu werben, um die Abhörsicherheit der Übertragung über "fremde" Relais-Stationen (Fahrzeuge) effizient zu erhöhen. Es wird weiterhin beabsichtigt, die Nutzung ratenloser Codierung für bestimmte Applikationen im Bereich Device-to-Device-Kommunikation (D2D-Kommunikation wie zum Beispiel Fahrzeug-zu-Fahrzeug-Kommunikation) näher zu untersuchen und gegebenenfalls wirtschaftlich zu verwerten. Aufgrund teilweise fehlender Kanalinformation sind bei solchen Kommunikationsszenarien relativ häufige Übertragungsfehler zu erwarten; es gilt daher, Verfahren zu entwickeln, die effizient mit partiellen Kanalkennnissen umgehen. Die Lösung für ausgewählte Anwendungen kann die Verwendung ratenloser Codierung sein.

Die Arbeiten im FundNet-Projekt haben zur Einladung zum METIS-Projekt innerhalb des siebten EU-Forschungsprogramms geführt (vgl. [www.metis2020.com/](http://www.metis2020.com/)). An Projekt wurde durch ein Industriekonsortium bestehend aus allen wichtigen Netzausrüstern und mehreren Netzbetreibern einschließlich der Deutschen Telekom AG initiiert, um Fundamente für die fünfte Generation (5G) von Mobilfunknetzen zu legen. Das Konsortium wurde um ausgewählte akademische Partner ergänzt, die zusammen mit der Industrie an der Entwicklung neuer Mobilfunkstandards nach 2020 arbeiten. Die Forschungsgruppe von Herrn Dr. Stanczak wurde zur Mitwirkung an der Erarbeitung neuer Mechanismen zur Vernetzung in künftigen Mobilfunknetzen eingeladen. Der Schwerpunkt der Arbeiten liegt auf der Interferenzidentifikation und -management, vor allem im Kontext der D2D-Kommunikation. Ferner ist die Gruppe mitverantwortlich für die Entwicklung neuer

---

<sup>1</sup>Eine wichtige Kontext-Information ist zum Beispiel die Information über die geplante Route; diese Information ist in modernen Fahrzeugen vorhanden und kann für die Handover-Optimierung verwendet werden.

Zellkonzepte und soll einen Beitrag zur Unterstützung mobiler Nutzer in dichten Funknetzen leisten. In diesem Zusammenhang ist es geplant, das im FundNet-Projekt erworbene Know-How bei der Gestaltung der Funksysteme fünfter Generation zu verwerten. Neben der FundNet-Resultate zur effizienten Multicast-Kommunikation durch den Einsatz ratenloser Codierung sind in diesem Zusammenhang vor allem die Arbeiten zur Max-Min-Optimierung von großer Bedeutung; sie werden in die Entwicklung neuartiger Konzepte für das robuste Interferenzmanagement einfließen. Auf diesem Gebiet findet eine enge Kooperation mit der Firma Ericsson im Kontext der D2D-Kommunikation statt. Es wurde zum Beispiel eine gemeinsame Veröffentlichung zu "Signal Processing Magazine" eingereicht, in der potentielle Lösungsansätze vorgestellt wurden.

Neben dem METIS-Projekt wurde auch das Projekt 5G-NOW durch die Forschungsgruppe von Herrn Dr. Stanczak initiiert. In diesem Projekt werden die im FundNet-Projekt erarbeiteten Verfahren zur Interferenz-Alignment bezüglich ihrer Tauglichkeit für den Einsatz in Mobilfunknetzen fünfter Generation untersucht.

Für November 2013 ist ein Besuch von Herrn Dr. Stanczak bei der Firma Nokia Solutions and Networks (NSN) in Breslau geplant, wo ausgewählte FundNet-Resultate vorgestellt werden; eine Kooperation einschließlich der Verwertung der Resultate wird angestrebt.

Schließlich ist es geplant, zusammen mit der Firma Winco-Nixdorf AG an der Entwicklung einer neuen Generation von funkbasierten Kassen- und Abrechnungssystemen zu arbeiten. Dabei handelt es sich um vermaschtes Kommunikations- und Speichersystem, in dem neben der Latenzzeit vor allem Sicherheits- und Zuverlässigkeitsaspekte eine entscheidende Rolle spielen. Die Kooperation entstand in Folge einer Präsentation von FundNet-Resultaten zur ratenlosen Codierung und Netzwerkcodierung. Die im FundNet-Projekt entwickelten Techniken sollen die Erfüllung bestimmter Anforderungen an Kassen- und Abrechnungssysteme ermöglichen.

## 2.5 Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Fortschritte im Bereich der Netzwerk Informationstheorie wurden von Abbas El Gamal an der Stanford Universität gemacht. Im Januar 2012 erschien das Buch "Network Information Theory" von Abbas El Gamal und Young-Han Kim im Verlag Cambridge University Press.

Interessante Fortschritte auf dem Gebiet des *interference alignment* wurden an der Stanford Universität in der Gruppe von Syed Ali Jafar gemacht. Es wurden *interference alignment* Verfahren entwickelt die auch mit partieller oder verspäteter Kanalkennntnis eine gute Performanz erreichen und deren Performanz Grenzen wurden analysiert.

Im Bereich der Anwendung der ratenlosen Kodierung in two-hop und multi-hop drahtlosen Netzwerken wurden ebenfalls einige Fortschritte erzielt. In der Forschungsgruppe um Muriel Medard und Dina Kitabi (Massachusetts Institute of Technology) sowie Sachin Katti (Stanford University) wurden einige Schemen und Protokolle ausgearbeitet, die die Übertragung nach dem ratenlosen Prinzip, mit Bearbeitung der gesendeten Pakete an

den Relais-Knoten, ermöglichen. Begleitend dazu wurden auch praktische Implementierungen durchgeführt, die die Machbarkeit der Konzepte eindeutig demonstrieren.

## 2.6 Veröffentlichungen

Die im Verlauf des Vorhabens erzielten Ergebnisse führten zu:

- 29 Tagungsbeiträge (davon zwei eingeladene Beiträge)
- 7 Veröffentlichungen in Zeitschriften
- 3 eingeladene Vorträge:
  - Slawomir Stanczak, “Distributed Wireless Networking”, Bell Labs Stuttgart, Mai 2010
  - Slawomir Stanczak, “Trends and advances in the theory of self-organizing cellular wireless networks”, Fundamentals of Future Networking Workshop, Helsinki, November 2011
  - Slawomir Stanczak, “Progress and challenges in decentralized resource allocation optimization”, The 21st International Symposium on Mathematical Programming (ISMP), Berlin, August 2012
- 1 Dissertation und 3 angefangene Dissertationen
  - Jörg Bühler: “Capacity Computation and Duality for Wireless Communication Systems”, Berlin 2012
- 3 Diplomarbeiten

# Literatur

- [BS12] J. Buehler and S. Stanczak. Energy-Efficient Decode and Forward Relaying in Diamond Networks. In *Proc. 50th Annual Allerton Conference on Communication, Control and Computing*, Urbana-Champaign, IL, USA, October 2012. accepted for publication.
- [GS11] A. Giovanidis and S. Stanczak. Stability and distributed power control in manets with per hop retransmissions. *IEEE Trans. Commun.*, 2011. to appear.
- [KMS13] Michal Kaliszan, Jafar Mohammadi, and Slawomir Stanczak. Cross-Layer Security in Two-Hop Wireless Gaussian Relay Network with Untrusted Relays. In *IEEE International Conference on Communications (ICC'13)*, June 2013, , 2013. accepted for publication.
- [KPS11] M. Kaliszan, E. Pollakis, and S. Stanczak. Efficient beamforming algorithms for MIMO multicast with application-layer coding. In *Proc. IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)*, St. Petersburg, Russia, August 2011.
- [KPS12] M. Kaliszan, E. Pollakis, and S. Stanczak. Multigroup Multicast with Application-Layer Coding: Beamforming for Maximum Weighted Sum Rate. In *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Paris, France, April 2012. accepted.
- [KS10] M. Kaliszan and S. Stanczak. Maximizing Lifetime in Wireless Sensor Networks under Opportunistic Routing. In *Proc. 44th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, November 2010.
- [LKS11] Q. Liao, M. Kaliszan, and S. Stanczak. A virtual soft handover method based on base station cooperation with fountain codes. In *Accepted for publication in Proc. 17th European Wireless Conference*, Vienna, Austria, April 2011.
- [MKS12] J. Mohammadi, M. Kaliszan, and S. Stanczak. Secrecy Capacity Limits of Multiple Antenna Multiple Eavesdropper Multicast. In *Proc. Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers (ACSSC '12)*, Pacific Grove, CA, USA, November 2012. accepted.
- [MS11] S. Maghsudi and S. Stanczak. A hybrid centralized-decentralized resource allocation scheme for two-hop transmission. In *International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS'11)*, pages 91–96, 2011.

- [MS12a] S. Maghsudi and S. Stanczak. A Delay-Constrained Rateless Coded Incremental Relaying Protocol for Two-Hop Transmission. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'12)*, pages 168–172, Paris-France, April 2012.
- [MS12b] S. Maghsudi and S. Stanczak. Joint Power Allocation and Relay Selection for Network-Coded Two-Way Relaying. In *46th Annual Conference of Information Sciences and Systems (CISS'12)*, pages 1–6, Princeton-U.S.A, March 2012.
- [MS12c] S. Maghsudi and S. Stanczak. On network-coded rateless transmission: Protocol design, clustering and cooperator assignment. In *International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS'12)*, pages 306–310, 2012.
- [MS13a] S. Maghsudi and S. Stanczak. Dynamic Bandit with Covariates: Strategic Solutions with Application to Wireless Resource Allocation. In *IEEE International Conference on Communications (ICC'13)*, Budepest-Hungary, June 2013. accepted.
- [MS13b] S. Maghsudi and S. Stanczak. Relay Selection Problem in Wireless Networks: A Solution Concept Based on Stochastic Bandits and Calibrated Forecasters. In *IEEE Workshop on Signal Processing: Advances in Wireless Communications (SPAWC'13)*, 2013. 385-389.
- [MS13c] S. Maghsudi and S. Stanczak. Relay Selection with No Side Information: An Adversarial Bandit Approach. In *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC'13)*, pages 715–720, Shanghai-China, April 2013.
- [MWB13] R. F. Wyrembelski M., Wiese, and H. Boche. Strong secrecy in bidirectional broadcast channels with confidential messages. *Information Forensics and Security, IEEE Transactions on*, 8(2):324 –334, feb. 2013.
- [SFWB10] S. Stanczak, A. Feistel, M. Wicznanowski, and H. Boche. Utility-based power control with QoS support. *Wireless Networks (Springer)*, 16(6):1691–1705, Aug. 2010.
- [SJS13] Jan Schreck, Peter Jung, and Slawomir Stanczak. On Channel State Feedback for Two-Hop Networks Based on Low Rank Matrix Recovery. In *IEEE International Conference on Communications (ICC'13)*, June 2013. accepted for publication.
- [SKG11a] S. Stanczak, M. Kaliszan, and M. Goldenbaum. Max-Min Fair Rate Control Based on a Saddle-Point Characterization of Some Perron Roots. In *Accepted for publication in Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP '11)*, Prague, Czech Republic, May 2011.

- [SKG11b] S. Stanczak, M. Kaliszan, and M. Goldenbaum. On Distributed Power Control and Transceiver Optimization in Wireless Networks. In *Proc. 5th International ICST Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools (ValueTools '11)*, Cachan, France, May 2011. invited.
- [SS12] J. Schreck and S. Stanczak. On SINR Balancing for a Two-Hop Downlink Channel. In *Proc. 46th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, volume nov, Monterey, CA, USA, 2012.
- [TS10] D. Tomecki and S. Stanczak. On Feasible SNR Region For Multicast Downlink Channel: Two User Case. In *Accepted for publication in Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP '10)*, Dallas, USA, March 2010.
- [WB11a] R. F. Wyrembelski and H. Boche. Service integration in multiantenna bidirectional relay networks: Public and confidential messages. In *Proc. IEEE Global Communications Conference: Physical-Layer Security Workshop (GLOBECOM - PLS '11)*, Houston, TX, USA, December 2011.
- [WB11b] R.F. Wyrembelski and H. Boche. Bidirectional broadcast channels with common and confidential messages. In *Information Theory Workshop (ITW), 2011 IEEE*, pages 713 –717, oct. 2011.
- [WB12] R. F. Wyrembelski and H. Boche. Privacy in bidirectional relay networks. *IEEE Trans. Commun.*, 2012. accepted for publication.
- [WBB10a] R. F. Wyrembelski, I. Bjelakovic, and H. Boche. Bidirectional Relaying in Wireless Networks - Impact of Degree of Coordination. In *Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP '10)*, pages 3234–3237, Dallas, Texas, USA, March 2010.
- [WBB10b] R. F. Wyrembelski, I. Bjelakovic, and H. Boche. List Decoding for Bidirectional Broadcast Channels with Unknown Varying Channels. In *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC '10)*, pages 1–6, Cape Town, South Africa, May 2010.
- [WBB10c] R. F. Wyrembelski, I. Bjelakovic, and H. Boche. On Arbitrarily Varying Bidirectional Broadcast Channels with Constraints on Input and States. In *Proc. IEEE International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA '10)*, Taichung, Taiwan, October 2010. accepted.
- [WBOB10] R. F. Wyrembelski, I. Bjelakovic, T.J. Oechtering, and H. Boche. Optimal coding strategies for bidirectional broadcast channels under channel uncertainty. *IEEE Trans. Commun.*, 58(10):2984 – 2994, Oct. 2010.
- [WJS12] G. Wunder, P. Jung, and J. Schreck. Multiuser MIMO systems using codebook tailored limited feedback protocol. In *IEEE ITG Workshop on Smart Antennas*, 2012.

- [WOB10] R. F. Wyrembelski, T. J. Oechtering, and H. Boche. MIMO Bidirectional Broadcast Channels with Common Message. In *Proc. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM '10)*, Miami, Florida, USA, December 2010.
- [WOB11] R. F. Wyrembelski, T. J. Oechtering, and H. Boche. MIMO Gaussian Bidirectional Broadcast Channels with Common Messages. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 10(9):2950–2959, September 2011.
- [WRSJ13] Gerhard Wunder, Supreeth Raghuprakash, Jan Schreck, and Peter Jung. Multi-User MIMO Multi-Cell Systems: Finite SNR Rate Loss Gap Analysis. In *17th International ITG Workshop on Smart Antennas (WSA'13)*, March 2013.
- [WSB11] R. F. Wyrembelski, A. Sezgin, and H. Boche. Secrecy in broadcast channels with receiver side information. In *Proc. Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers (ACSSC '11)*, Pacific Grove, CA, USA, November 2011.
- [WSJ12] G. Wunder, J. Schreck, and P. Jung. Nearly doubling the throughput of multiuser MIMO systems using codebook tailored limited feedback protocol. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2012. revised.
- [WWB11] R. F. Wyrembelski, M. Wiese, and H. Boche. Strong secrecy in bidirectional relay network. In *Proc. Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers (ACSSC '11)*, Pacific Grove, CA, USA, November 2011. invited.