

# **Abteilung für Informationstheorie und Kommunikationssysteme (Jorswieck)**

## **1. Forschungsfelder der Abteilung**

Die neu gegründete Abteilung forscht zum einen an neuen Methoden und Werkzeugen der angewandten Informationstheorie, die für die Analyse, die Optimierung und den Entwurf von modernen Kommunikationssystemen eingesetzt werden. Zum anderen arbeiten wir an dem Systementwurf in den folgenden vier Bereichen: PhySec – Sicherheit auf der Übertragungsschicht, CelCom – Zellulare Kommunikationssysteme, Wi-Fi – Moderne drahtlose lokale Netzwerke, Wireless Body Area Networks (WBAN) – drahtlose Netzwerke im und auf dem menschlichen Körper. Die Forschung konzentriert sich auf methodisch mathematische Kernthemen (Netzwerk-Informationstheorie, multikriterielle Optimierung, Spieltheorie, informationstheoretische Sicherheit, mehrkanalige Signalverarbeitung und maschinelles Lernen) und deren Anwendungen und Implementierungen in zeitgemäßen relevanten und aktuellen nachrichtentechnischen Verfahren und Systemen (Internet-der-Dinge (IoT), Industrie 4.0, Cyber Physical Systems (CPS), 5G und beyond 5G (B5G)).

**PhySec:** Die Realisierung der Zukunftsvision des Internet-der-Dinge und der Industrie 4.0, in der sehr viele heterogene Geräte, Aktoren und Sensoren, zuverlässig und sicher kommunizieren werden, benötigt eine neue Sicherheitsarchitektur, die skaliert und infrastrukturlos funktioniert. Physikalische Parameter aus der verwendeten Hardware und des Übertragungskanal erlauben die Entwicklung von neuen informationstheoretisch sicheren Primitiven. Wir erforschen die sichere Übertragung über unzuverlässige und unbekannt drahtlose Kanäle, über optische Multimode-Glasfaser-Kanäle mit Abhörern und über zustandsabhängige Kanäle mit aktiven Angreifern.

**CelCom:** Der Bereich umfasst sowohl aktuelle Mobilfunksysteme der 4. (LTE/A) und der 5. (5G, NR) als auch zukünftiger Generationen. Die Analyse und der Entwurf von neuen Übertragungsverfahren (PHY+MAC) beinhaltet die Kanalcodierung und -decodierung, die Signalverarbeitung am Sender und Empfänger (oder Relay) sowie neue Algorithmen der Ressourcen-Allokation, des Scheduling und der Zugangsverfahren. Gerade die Flexibilität durch Software-Defined Networks erlaubt eine effiziente Ressourcenvergabe und robuste und resiliente Kommunikation. Wir entwickeln neue Algorithmen zur Ressourcenvergabe und Sendestrategieoptimierung in zeitvarianten dynamischen komplexen Interferenznetzwerken.

**Wi-Fi:** In Zukunft werden immer dichtere private drahtlose lokale Netzwerke entstehen, die interferenzbegrenzt und unkoordiniert (alternativ zu managed Wi-Fi) das unlicenzierte Spektrum belegen. Zusätzlich erhöhen sich die Daten-

raten durch die große Anzahl an drahtlosen Geräten und durch Offloading von Makro-Mobilfunkzellen. Deshalb werden neue Verfahren und Ansätze zum verteilten Interferenzmanagement benötigt. Zur Optimierung der Funkressourcen setzen wir Ansätze aus dem maschinellen Lernen ein. Neue Verfahren zur Kanalcodierung und -decodierung werden durch Autoencoder gefunden. Wir konzentrieren uns auf Wi-Fi-Netzwerke (IEEE 802.11), deren Modellierung, Analyse, Optimierung und den effizienten Entwurf und Betrieb sowie deren Koexistenz mit anderen, z.B. zellularen Netzwerken.

WBAN: Gerade in neuen medizinischen Anwendungen werden Sensoren (und Aktoren) am menschlichen Körper angebracht, die physikalische Messgrößen effizient erfassen und bei Bedarf an ein drahtloses Fusion-Center übermitteln müssen. Basierend auf IEEE 802.15-Standards werden neue Verfahren der verteilten Signalverarbeitung und Codierung benötigt, um die anfallenden Datenmengen mit geringen Latenzzeiten und mit wenig Energieverbrauch an die zentralen Knoten zu schicken. Wir beschäftigen uns mit der Signalverarbeitung und Kommunikation für drahtlose Körpernetzwerke und der Anwendung des maschinellen Lernens (statistische Signalverarbeitung und Lernen) zur Signalrekonstruktion durch Entfernen von störenden Artefakten.

## **2. Projekte**

Erfreulicherweise konnten fünf Forschungsprojekte, die von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert werden, an die TU Braunschweig transferiert werden. Vier dieser fünf laufenden Projekte werden mit Kooperationspartnern durchgeführt. Im Berichtszeitraum sind bzw. waren wir in den folgenden internationalen und nationalen Forschungsvorhaben engagiert:

### **2.1 Internationale Projekte**

In einem DFG-Projekt mit dem Titel „Effiziente Ressourcenvergabe in drahtlosen Software-Defined Networks“ arbeiten wir mit Professor Nader Mokari von der Tarbiat Modares Universität in Teheran, Iran, gemeinsam an neuen Optimierungsverfahren für die effiziente Ressourcenvergabe in drahtlosen Interferenznetzwerken. Das Projekt hat bereits zu einer Veröffentlichung in den IEEE Transactions on Mobile Computing [REZ/JOR1] geführt. Ein gemeinsamer Workshop mit den beteiligten Projektleitern und Wissenschaftlern ist geplant.

## **2.2 Nationale Projekte**

Im DFG-Projekt „Physical Layer Security for Channels with State and Active Eavesdroppers“ wird gemeinsam mit Professor Holger Boche von der TU München an den grundlegenden Grenzen der sicheren Übertragung über Compound- und zufällig-variierende Kanäle mit aktiven und passiven Angreifern geforscht. Diese Kanalmodelle entsprechen einem schnellen Schwundkanal und einem Kanal mit einem Angreifer, der die Signalübertragung bewusst stört (Jammer). Ein weiteres DFG-Projekt aus dem Bereich PhySec ist ein Gemeinschaftsprojekt mit Professor Jürgen Czarske von der TU Dresden und heißt „Informationssicherheit auf der Übertragungsschicht in Multimode-Glasfaser-Kommunikationssystemen“. Das Ziel des Projektes ist eine sichere Übertragung über eine abgehörte Multimode-Glasfaser-Verbindung. Das dritte DFG-Projekt aus dem PhySec-Bereich „Signalverarbeitung am Kanaleingang für sichere Übertragungen über Fast-Fading-Kanäle mit statistischer Kanalkennntnis am Sender“ wird von Dr. Pin-Hsun Lin geleitet und beschäftigt sich mit neuen Signalformen und Vor-Codierung für sichere Übertragung über schnelle Schwundkanäle. Schließlich beschäftigt sich das DFG-Projekt „Robuste Rekonstruktion für drahtlose Body Area Sensor Netzwerke“, das in Zusammenarbeit mit Dr. Waltenegus Dargie von der TU Dresden durchgeführt wird, mit der Rekonstruktion von Zeitsignalen, die am Körper verteilt gemessen und über ein WBAN übertragen werden.

## **3. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Abteilung**

Seit August 2019 sind vier Wissenschaftliche Mitarbeiter in der Abteilung beschäftigt. Die Forschungsgebiete der informationstheoretisch sicheren Übertragung über Abhörerkanäle wird von Dr. Pin-Hsun Lin, Carsten Janda und Andrew Lonnstrom bearbeitet. Herr Karl-Ludwig Besser arbeitet zum einen an Machine-Learning-Algorithmen zur Optimierung der Kanalcodierung und -decodierung, zum anderen an statistischen Signalverarbeitungsverfahren für die bessere Detektion und Rekonstruktion von Zeitsignalen. Im gemeinsamen DFG-Projekt mit dem iranischen Partner wurde Herr Sepehr Rezvani Ende Oktober bei uns eingestellt und wird seine Arbeit an der TU Braunschweig als Wissenschaftlicher Mitarbeiter fortsetzen.

## **4. Sicherheit auf der Übertragungsschicht (PhySec)**

Im Folgenden bieten wir einen knappen Überblick über die Forschungsaktivitäten in den oben genannten Bereichen. Dieses Jahr konzentrieren wir uns auf die Sicherheit auf der Übertragungsschicht (PhySec) und die zellulare Kommunikation (CelCom).

## 4.1 Sichere Übertragung über zustandsabhängige Kanäle und aktiven und passiven Abhörern

Aktuell rücken informationstheoretische Sicherheitsansätze als Ergänzung zu kryptografischen Techniken immer mehr in den Fokus. Unter Berücksichtigung der physikalischen Eigenschaften des Übertragungsmediums ermöglichen sie eine gemeinsame Implementierung sowohl zuverlässiger als auch sicherer Kommunikation auf dem Physical Layer. Dieses Forschungsgebiet bietet vielversprechende Ansätze, um unbedingte Sicherheit zu erreichen und sichere Übertragungsverfahren in kabellose Netzwerke einzubetten. Bisher wurde in den Untersuchungen perfekte Kanalkenntnis bei allen Kommunikationsteilnehmern vorausgesetzt. In praktischen Systemen ist jedoch wegen kabelloser Kommunikation und Ungenauigkeit die Kanalzustandsinformation nur begrenzt verfügbar. Um kabellose Systeme resilient gegen natürliche Fehler oder durch einen Angreifer induzierte Attacken zu entwickeln, sind der Compound Channel (CC) und der Arbitrarily Varying Channel (AVC) die richtigen Systemmodelle. Dabei bleibt im CC-Modell der Kanalzustand während der Übertragung eines gesamten Codeblocks konstant, während sich bei dem AVC-Modell der Kanalzustand bei jeder Kanalbenutzung beliebig ändern kann. Dies modelliert nahezu beliebige Attacken.

Unser Ziel ist es, fundamentale Eigenschaften des Compound Wiretap Channels und des Arbitrarily Varying Wiretap Channels mit aktivem Angreifer, der auf bösartige Weise den Kanalzustand beeinflusst, zu verstehen. Für die Entwicklung von Systemen ist es wichtig, Beschränkungen der Möglichkeiten des Senders als auch des Angreifers richtig zu modellieren. In der Tat ist man an Ansätzen interessiert, die verhindern, dass kleine Veränderungen bezüglich des Kanalzustands in großen Verlusten der Performanz, also der Sicherheitskapazität, resultieren. Dieses ist insbesondere im Kontext eines aktiven Angreifers, der auf eine beliebige Art und Weise den Kanalzustand beeinflussen kann, wünschenswert. Wir entwickeln informationstheoretische Ansätze basierend auf allgemeinen Kanalmodellen, um Attacken auf Kommunikationssysteme mit eingebetteter Sicherheit zu modellieren.

In diesem Zusammenhang wird ein Arbitrarily Varying Wiretap Channel (AVWC) mit nichtkausaler Kenntnis des Kanalinputs beim Jammer untersucht. Es konnte ein Codierungstheorem entwickelt und eine Multi-Letter-Formel zur Berechnung der Sicherheitskapazität bestimmt werden. Dazu wurde die Existenz eines Kanals, der die Information zum Abhörer maximiert, angenommen. Für den stark degradierten Fall konnte eine Single-Letter-Formel zur Berechnung der Sicherheitskapazität bestimmt werden. Die Ergebnisse sollen sowohl bei einer Zeitschrift als auch in Auszügen bei der ISIT 2020 (International Symposium on Information Theory) eingereicht werden.

## 4.2 Machine Learning für den Entwurf sicherer Kanalcodes

In industriellen Anwendungen kommunizieren immer mehr Maschinen drahtlos und zur selben Zeit, wobei gleichzeitig steigende Anforderungen an Zuverlässigkeit, Latenz und Vertraulichkeit entstehen. Aus der Informationstheorie ist bekannt, dass Wiretap Codes asymptotisch Zuverlässigkeit erreichen können (verschwindende Fehlerrate (block error rate – BLER) beim legitimen Empfänger Bob) und gleichzeitig Geheimhaltung erreichen (verschwindender Informationsverlust (information leakage – IL) zu einem Abhörer Eve). Bei Verwendung einer endlichen Blocklänge gibt es jedoch einen Kompromiss zwischen der Fehlerwahrscheinlichkeit bei Bob und dem Informationsverlust zu Eve. In unserer Arbeit [BES/JAND/LIN/JOR1] stellen wir ein flexibles Wiretap-Code-Design für degradierte Gaußsche Wiretap-Kanäle unter endlicher Blocklänge vor, mit welchem man den Betriebspunkt an der Pareto-Grenze zwischen BLER und IL verschieben kann. Um dies zu erreichen, formulieren wir ein Optimierungsproblem mit mehreren Zielfunktionen, das sowohl die Zuverlässigkeit zu Bob als auch den Informationsverlust zu Eve berücksichtigt. Dabei wird die BLER durch den mittleren quadratischen Fehler und der IL durch Schemata, die auf Jensens Ungleichung und der Taylor-Entwicklung basieren, angenähert. Das Optimierungsproblem wird dann durch neuronale Netzwerke in Form eines Autoencoders gelöst. Simulationsergebnisse zeigen, dass das vorgeschlagene Verfahren Codes finden kann, die polare Wiretap-Codes in Bezug auf BLER und IL gleichzeitig übertreffen. Wir zeigen außerdem, dass die von den Autoencodern gefundenen Codes mit realen Modulationsverfahren mit nur geringen Verlusten implementiert werden können.

## 4.3 Optimale Eingangssignale für sichere Datenübertragung

Wir gehen die fundamentalen Herausforderungen für den ganzheitlichen Entwurf von sicheren Übertragungssystemen für schnelle Abhör-Schwundkanäle mit statistischer Kanalinformation am Sender (channel state information at the transmitter – CSIT) an. Der Ansatz konzentriert sich auf den Kanaleingang und beinhaltet zwei Teile:

1. Entwurf der Eingangsverteilung der Sendesignale und des künstlichen Rauschens
2. Entwurf der sicheren Kanalcodierung.

Die betrachtete Kanalinformation kann einfach a priori offline Indoor oder Outdoor gesammelt werden oder von vorherigen Übertragungen bekannt sein. Falls Alice senden möchte, kann sie die statistische Kanalinformation zwischen ihr und dem nächstgelegenen Teilnehmer ausnutzen, um den Abhör-Code für den schlimmsten Fall zu entwickeln. Dadurch gelingt es, die unrealistische Annah-

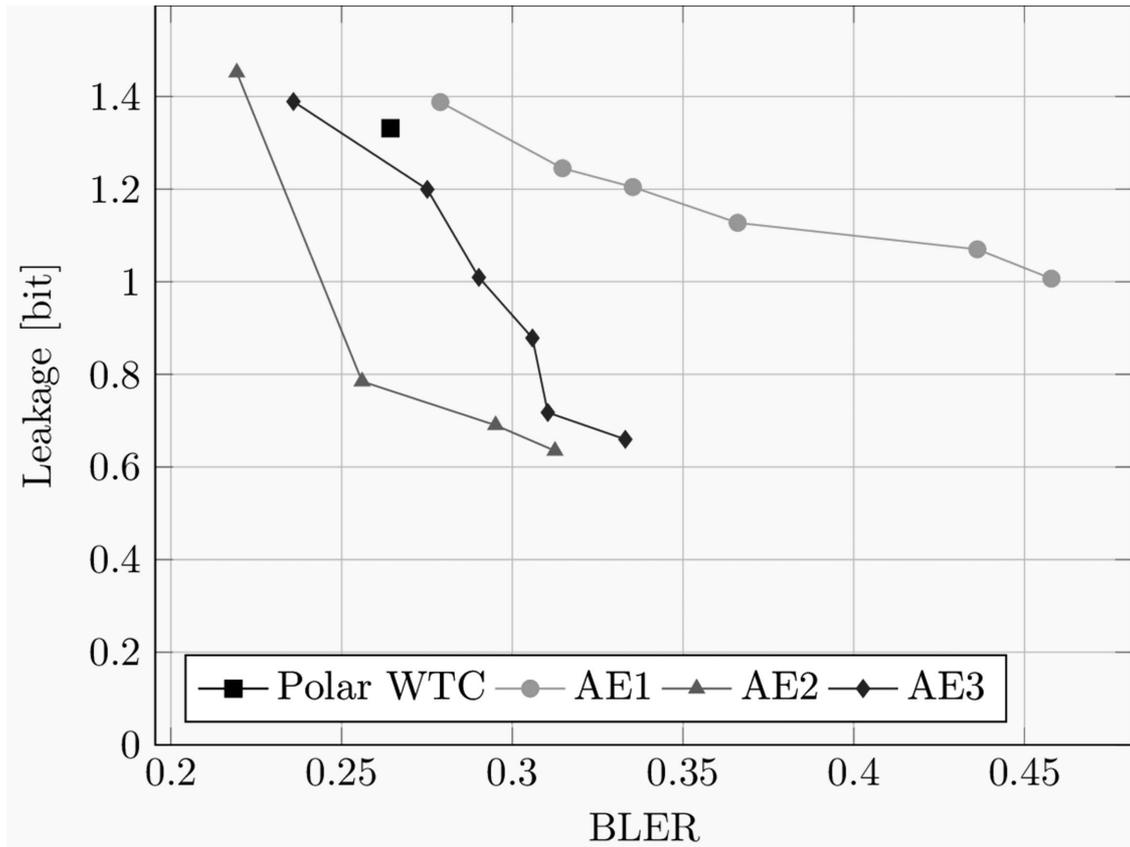


Abbildung 7: Informationsverlust über Fehlerrate für den Polar Wiretap Code (Stand der Technik) und den mit neuronalen Netzwerken mit verschiedenen Hyperparametern gefundenen Codes

me perfekter Kanalinformation fallen zu lassen. Die optimalen Eingangssignale für das Szenario sind im Allgemeinen nicht bekannt, bekannt sind sie nur für wenige spezielle Annahmen. Optimale Sendestrategien und der effiziente Codeentwurf sind ebenfalls unbekannt. In diesem Projekt werden eben solche Fragen Schritt-für-Schritt beantwortet und dabei die Signalisierung und Codierung entwickelt.

Um die Sicherheitsrate zu verbessern, wenn keine perfekte Kanalinformation zu Eve, der Abhörerin, vorliegt, wird für gewöhnlich künstliches Rauschen (artificial noise – AN) verwendet. In den gängigen AN-Verfahren werden drei Faktoren gradlinig bestimmt: 1) Der zeitliche Ablauf: In den meisten Fällen wird AN in schnellen Schwundkanälen mit unvollständiger Kanalkennntnis eingeführt. 2) Die Richtung des AN: AN wird in die orthogonale Richtung (dem sogenannten Nullraum) zu Bobs Kanal gesendet, um Interferenz am legitimierten Empfänger zu vermeiden. 3) Die Eingangsverteilung des Nachrichten- und AN-Signals: Diese beiden Signale werden als Gauß-verteilt zum Rechnen angenommen. Al-

lerdings ist diese Wahl nicht nur suboptimal, sondern behindert auch die grundlegende Charakterisierung des Prefixings für nicht-degradierte Abhörkanäle. Wir untersuchen den ersten und dritten Faktor. Für den ersten leiten wir notwendige und hinreichende Bedingungen für AN her. Für den dritten entwerfen wir Signalverteilungen. Außerdem entwickeln wir Polar Codes für Abhörkanäle mit statistischer CSIT. Ein Beispiel ist in **Abbildung 7** dargestellt. Auf der X-Achse wird die Blockfehlerrate am gewünschten Empfänger aufgetragen, während auf der Y-Achse der Informationsverlust an den Abhörer aufgetragen wird. Der Stand der Technik ist ein Polar Wiretap Code. Unser Autoencoder Algorithmus kann bei geeigneter Wahl der Hyperparameter (hier mit AE1, AE2 und AE3 betitelt) Arbeitspunkte erreichen, die geringere Fehlerrate und weniger Informationsverlust erreichen.

Zusammenfassend ist das Forschungsziel des Projekts ein vollständiger Entwurf der Eingangssignale für Abhörkanäle mit statistischer CSIT, der bisher ungeklärt ist. Durch die Annahme dieser Herausforderungen führen wir Methoden der Wahrscheinlichkeitstheorie in den Werkzeugkasten der Nachrichtentechnik, z.B. stochastische Ordnungen, ein. Diese werden verwendet, um ein Rahmenwerk für die Ressourcen-Vergabe in Mehrnutzer-Netzwerken mit imperfekter CSIT zu erzeugen.

Derzeit betrachten wir den binären Fading-Interferenzkanal mit statistischer CSIT. Es ist eine Fortsetzung einer früheren Arbeit über die Kapazitäten von Mehrbenutzerkanälen im Rahmen der statistischen CSIT, die in [LIN/JOR/JAND1], [LIN/JOR/JAND2] vorgestellt wurde. Außerdem haben wir den Zusammenhang zwischen Geheimhaltung und Datenschutz untersucht [JOR5]. Die Ergebnisse wurden noch im Dezember auf dem Workshop for Information Security (WIFS) 2019 vorgestellt.

Ein weiterer Ansatz zur Generierung von sicheren drahtlosen Verbindungen durch Ausnutzen der Parameter der Übertragungsschicht ist die Erzeugung von sicheren Schlüsselpaaren durch reziproke Kanalparameter. Hier werden in beiden Richtungen schnelle Kanalschätzungen durchgeführt und anschließend durch ein Protokoll ein gemeinsamer Schlüssel erzeugt. In [JOR6] wird ein Überblick über die Möglichkeiten dieser sicheren Schlüsselerzeugung für 5G und nachfolgende Netzwerktechnologien gegeben. Die speziellen Eigenschaften der massive MIMO- und mmWave-Systeme haben einen signifikanten Einfluss auf die erreichbaren sicheren Schlüsselraten.

Schließlich beschäftigt sich die Arbeit in [LIN/JOR1] mit erreichbaren Sicherheitsraten und sicheren Schlüsselraten in Mehrantennen-Mehrbenutzersystemen, die sowohl eine hohe Energieeffizienz als auch eine vertrauliche Übertragung unterstützen.

#### 4.4 Sichere Übertragung über Multimode-Glasfaser-Kanäle

Optische Netzwerke sind das Rückgrat unserer Informations- und Kommunikationsgesellschaft und haben sich von einem Single-Mode-System mit Datenraten von Megabit pro Sekunde zu einem Multi-Terabit-System entwickelt. Der Datenverkehr umfasst nicht nur Benutzerdaten, sondern auch unternehmenskritische Kommunikationsdienste, die empfindlich auf Abhör- und Störungsangriffe reagieren. Wir untersuchen die grundlegenden Grenzen physikalischer Layer-Sicherheitstechniken für die Datenübertragung durch optische Multimode-Fasern (MMF), sowohl theoretisch als auch experimentell. Basierend auf der gemessenen Übertragung werden charakteristische Kanalmodelle entwickelt und die informationstheoretischen Grenzen der abgegriffenen Glasfaserkanäle abgeleitet und analysiert. Verschiedene Vorcodierungs- und Modulationstechniken werden vorgeschlagen, um die Geheimhaltungsleistung in verschiedenen Angreiferszenarien zu verbessern.

Wir haben dieses Jahr einen ersten Zeitschriftenaufsatz eingereicht, bei dem die inverse Vorcodierung, wie sie auf MMF mit einem Spatial Light Modulator (SLM) angewendet wird, durchgeführt wurde. Auf Basis der gemessenen Übertragungsmatrix wurde dann nach inverser Vorcodierung eine Geheimhaltungsanalyse durchgeführt. In **Abbildung 8** werden gemessene Kanalmatrizen eines MMF-Kanals gezeigt. Oben ohne und unten mit Anwendung der inversen Vorcodierung. Ziel ist es, eine Diagonalmatrix mit Einsen auf der Diagonale zu erzeugen. Darüber hinaus wird derzeit im Bereich Machine Learning und dessen Anwendung auf Wiretap Codes speziell für einen multimodalen Faserkanal geforscht. Die Ergebnisse werden in einer Sondersitzung zum Thema Machine Learning und Physical Layer Security nächstes Jahr 2020 vorgestellt.

#### 5. Zellulare Kommunikationssysteme (CelCom)

Zellulare Kommunikationstechnologien dominieren unser heutiges Leben und das Interesse an Bandbreite scheint keine Grenzen zu kennen. Drahtlose Systeme der zweiten Generation bis zur vierten Generation heute, wurden entwickelt, um Teilnehmern drahtlose Verbindungen und hohe Datenraten anzubieten. Dieser Trend setzt sich in der 5. Mobilfunkgeneration fort. 5G beinhaltet aber auch neue Ziel-Merkmale, wie sehr hohe Verfügbarkeit und geringe Latenz, und adressiert neue Anwendungen, wie Maschinen-Kommunikation, welche diese Eigenschaften anfordern.

In diesem Kontext hat die International Telecommunication Union (ITU) drei 5G-Szenarien definiert: enhanced mobile broadband, massive machine-type communication (mMTC) und ultra-reliable low-latency communication (URLLC). Es sollen nun gleichzeitig verschiedene Anwendungen und Dienste in diesen Szenarien

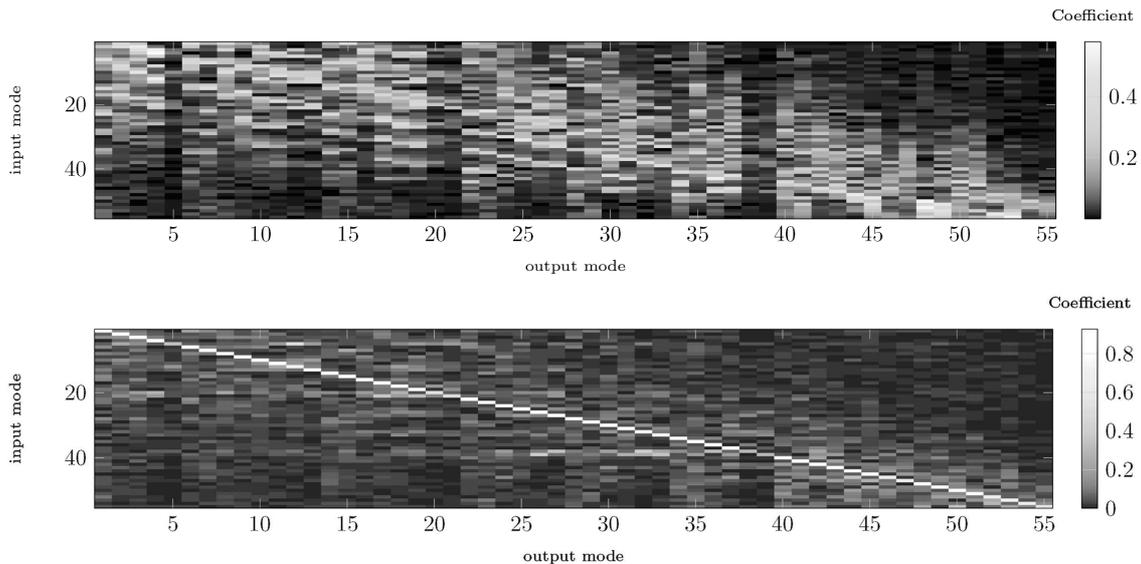


Abbildung 8: Transmissionsmatrixmessungen des MMF-Kanals vor (oben) und nach (unten) der Anwendung der inversen Vorcodierung mit einem SLM. Auf der Y-Achse sind die 52 Eingangsmoden und auf der X-Achse die 52 Ausgangsmoden aufgetragen. Der 'Coefficient' gibt die Dämpfung beim Übersprechen von einer Eingangs- auf eine Ausgangsmode an und liegt zwischen Null und Eins.

rien unterstützt werden. Deshalb ergeben sich neben der Erhöhung der Datenraten weitere neue Herausforderungen.

Um diese Anforderungen an Zuverlässigkeit für URLLC-Dienste zu erfüllen, können verschiedene Technologien eingesetzt werden. Durch Mehrwegeausbreitung und Mobilität zeigt der Übertragungskanal einen zeit- und frequenzvarianten Schwund (fading), der die Qualität und Zuverlässigkeit eines Links stark beeinträchtigt. Ein anderer wesentlicher limitierender Faktor ist die Interferenz und Begrenztheit der Funk-Ressourcen. Zur Beseitigung der Fading-Einflüsse und Erhöhung der Zuverlässigkeit werden Diversitätsverfahren eingesetzt, d.h., die Daten werden über verschiedene Wege vom Sender zum Empfänger transportiert und damit die Wahrscheinlichkeit, dass wenigstens ein Weg zuverlässig ist, erhöht. Die Idee wird auch in der Finanzwelt verwendet, um ein Aktienportfolio zu optimieren: Die Aktien sollen möglichst divers sein, damit das Portfolio robust gegenüber negativer Entwicklung an einem Markt ist. Man wählt dazu möglichst unabhängige Komponenten, z.B. Technologieaktien, Rohstoffe, Tourismusaktien oder Immobilien. Fällt der Aktienkurs in einem Markt, ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein anderer unabhängiger Markt stabil bleibt, groß.

In der Mobilkommunikation gibt es (mindestens) die folgenden Diversitätsarten: zeitliche, spektrale, räumliche und Mehr-Teilnehmer-Diversität. Diversitätsver-

fahren, die eine oder mehrere dieser Formen ausnutzen, sind bereits seit der 3. Mobilfunkgeneration im Einsatz. Seit LTE wird auch Dual- und in 5G Multi-Konnektivität unterstützt, bei dem gleichzeitig Verbindungen zu verschiedenen Zugangspunkten mit verschiedenen Technologien aufgebaut werden: eine LTE-Hauptverbindung zur ersten Basisstation und eine weitere 5G NR (new radio)-Verbindung zu einer weiteren Basisstation. Damit können zum einen die Ausfallsicherheit und zum anderen die Datenraten erhöht werden. Es eröffnet sich eine Vielzahl von neuen Möglichkeiten und Herausforderungen für die Ressourcenvergabe und die Zuweisung von Zugangsknoten zu Endgeräten. Die Konflikte zwischen den Anforderungen der Endgeräte führen zu interessanten gekoppelten multikriteriellen Optimierungsproblemen. In den folgenden beiden Abschnitten werden zwei Forschungsarbeiten aus der Abteilung für dieses Aufgabenfeld vorgestellt.

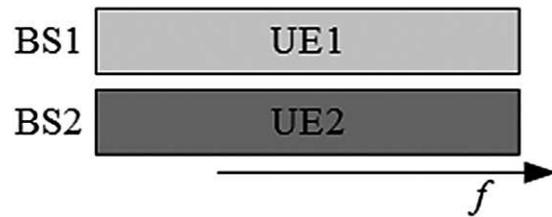
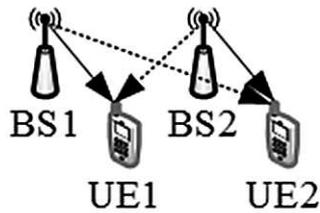
### 5.1 Multi-Connectivity für Ultra-Zuverlässigkeit

Der wesentliche erste Schritt in der Informationstheorie besteht darin, das Systemmodell so zu vereinfachen, dass die unwesentlichen Details abstrahiert werden, aber der Kern der Fragestellung herausgearbeitet wird. Deshalb stellen wir uns ein mehrzelliges Mehrteilnehmer-Netzwerk vor, in dem jedes Endgerät (user equipment – UE) zu jeder Basisstation (BS) zugewiesen werden kann, solange eine minimale Bedingung bezüglich der Empfangsleistung oder Distanz erfüllt ist. Außerdem kann sich jedes UE mit mehreren BS verbinden, die auf derselben Frequenz zur gleichen Zeit arbeiten. Einige Optionen der Verbindung sind für zwei UE und zwei BS exemplarisch in **Abbildung 9** dargestellt.

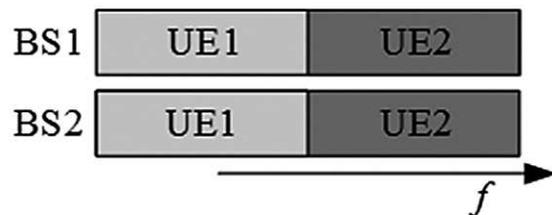
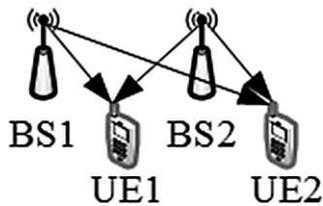
Verbindungsoption 1: Jedes UE ist mit genau einer BS verbunden. Die gesamte Bandbreite wird jedem UE zur Verfügung gestellt. Allerdings wird so auch die volle Interferenz der benachbarten BS empfangen. Verbindungsoption 2: Beide UE verbinden sich mit beiden BS, aber erhalten exklusiv die Hälfte der verfügbaren Bandbreite. Die Interferenz wird signifikant verringert. Aber beide UE erhalten auch deutlich weniger Bandbreite, nämlich die Hälfte. Verbindungsoption 3: In diesem asymmetrischen Fall verbindet sich UE1 mit beiden BS, während UE2 nur eine Verbindung mit BS1 erhält. UE1 verwendet den ersten Teil des Spektrums exklusiv, der zweite Teil wird von BS1-UE2 und BS2-UE1 gleichzeitig verwendet. So ist es möglich, unterschiedliche Dienste für UE1 und UE2 anzubieten.

In [JOR2] untersuchen wir verschiedene Verbindungsansätze: einfache, duale und mehrfache unter verschiedenen Lastsituationen und verschiedener Anzahl von BS. Es wird ein Ansatz zur Zuweisung von UE zu BS vorgeschlagen, der auf einem Matching-Markt basiert. Ein neuer Scheduling-Algorithmus wird entwi-

### Option 1



### Option 2



### Option 3

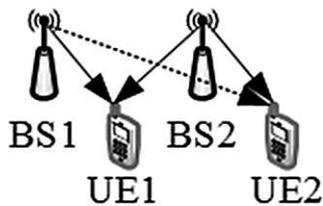


Abbildung 9: Abbildung 1 aus [JORS2]: Beispiel-Optionen der Verbindung zwischen zwei BS und zwei UE. Durchgezogene Linien sind die gewünschten Verbindungen, gestrichelte Linien sind nicht gewünschte, interferierende Verbindungen

ckelt, der die Unterbänder fair auf die UE verteilt. Die Performanz wird anhand von umfangreichen Systemlevel-Simulationen gezeigt.

Die grundlegende Idee der Mehrfach-Verbindung besteht darin, die Wahrscheinlichkeit zu maximieren, dass wenigstens eine Verbindung ausreicht, um die Dienstgüteanforderungen zu erfüllen. Wie im Beispiel mit dem Aktien-Portfolio versucht der Scheduler, möglichst unabhängige Verbindungen aufzubauen. Die zugrundeliegende gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung der Schwundkanäle spielt die entscheidende Rolle [JOR/LIN1]: Sind die beiden Kanäle vollständig korreliert, bringt die gemeinsame Verbindung keinen Diversitätsgewinn. Sind die beiden Kanäle vollständig negativ korreliert, bringen sie den größten Gewinn hinsichtlich der Ausfallwahrscheinlichkeit. Wir konnten in [JOR/LIN1] zeigen, dass mit negativ abhängigen Mehrfach-Verbindungen die Ausfallwahrscheinlichkeit auf identisch Null gebracht werden kann. So kann eine ultra-zuverlässige Verbindung ermöglicht werden. Die zugrundeliegende Methodik basiert auf Schranken für die gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung.

lung, die auch durch Copula modelliert werden können. Die Copula-Theorie wird in der Finanzmathematik zur Portfolio-Optimierung eingesetzt.

## 5.2 Effiziente globale Ressourcen-Allokation in nicht-orthogonalen Interferenz-Netzwerken

Sehr entscheidend für den Erfolg einer neuen Technologie ist, dass die Leistungsfähigkeit unter optimaler Verwendung derselben deutlich bessere Performance erzielt als der Stand der Technik. Daher ist es von fundamentaler Bedeutung, nach der Systemmodellierung ein klares Optimierungsproblem für den Systementwurf zu formulieren. Häufig sind diese Optimierungsprobleme allerdings sehr schwer zu lösen, weil die Zielfunktion zwar stetig, aber nicht konvex ist, oder die Nebenbedingungen zu einer nicht konvexen Menge führen. Die Algorithmen, die zur Lösung der Optimierungsprobleme gefunden werden, sollen auf der einen Seite nicht zu komplex sein, damit eine Online-Optimierung im laufenden Betrieb des Systems möglich ist, zum anderen aber auch eine sehr gute Performance zeigen. Deshalb ist es notwendig zu wissen, wie weit die Eigenschaften der entwickelten Algorithmen von der global optimalen Leistungsfähigkeit entfernt liegen. Dieser Aufgabe widmen sich eine Reihe von aktuellen Arbeiten in der Abteilung. In [JOR9], [JOR13], [JOR11] entwickeln wir neue Ansätze zur effizienten Lösung von globalen Optimierungsproblemen der Ressourcen-Vergabe in Interferenznetzwerken. Das klingt zunächst widersprüchlich, weil globale Optimierungsprobleme in der Regel exponentielle Komplexität in der Anzahl der Variablen aufweisen und entsprechend der Speicherbedarf ebenfalls steigt, aber unsere Optimierungsprobleme weisen Eigenschaften bezüglich der Monotonie und Konvexität auf, die ausgenutzt werden können, um selbst nicht-konvexe Probleme etwas effizienter und mit weniger Speicherbedarf zu lösen.

Ein Beispiel für eine nicht-konvexe Zielfunktion ist die Energieeffizienz eines Übertragungssystems. Diese Funktion ist quasi-konkav, hat ein globales Maximum, ist davor monoton steigend und danach monoton fallend, sowie abwechselnd konvex und konkav. Für ein bestimmtes Systemmodell, nämlich den Mehrwege-Relay-Kanal, konnten wir in [JOR11] die Energieeffizienz für drei Übertragungsverfahren maximieren: Simultaneous non-unique decoding (SND), traditionelles SND, sowie treating interference as noise (IAN).

Vor der Entwicklung unserer neuen Optimierungsverfahren war ein Vergleich dieser drei nur sehr schwer möglich – dazu sind in **Tabelle 1** die Laufzeiten im Stand der Technik (Dinkelbach) mit dem vorgeschlagenen Verfahren (Mosek und Gurobi-basiert) verglichen. Eine Effizienzsteigerung um den Faktor drei bis fünf ist erkennbar.

		SNR		
		0 dB	20 dB	40 dB
Gurobi	Mean	5.1438 s	0.1771 s	0.155 s
	Median	3.2781 s	0.0762 s	0.06 s
Mosek	Mean	15.0453 s	0.1368 s	0.0323 s
	Median	10.2756 s	0.0219 s	0.019 s
Dinkelbach	Mean	377.1501 s	145.4181 s	36.969 s
	Median	162.811 s	23.027 s	16.9229 s

Tabelle 1: Mittelwert und Median der Laufzeiten der Energieeffizienz-Optimierung für traditionelles SND mit einer Präzision von 0.01

In **Abbildung 10** kann man erkennen, dass für eine Energieeffizienzoptimierung beide Verfahren, SND und IAN, dieselbe Leistungsfähigkeit zeigen. Das traditionelle SND hat eine deutlich geringere Energieeffizienz.

In einem anderen Anwendungsszenario [JOR4], nämlich einem Full-Duplex (FD) Device-to-Device (D2D) Netzwerk, in dem mehrere FD-D2D-Paare mit einem makrozellularen System koexistieren, wird ebenfalls die global optimale Lösung der Ressourcen-Allokation gesucht.

Das resultierende Optimierungsproblem ist wieder nicht-konvex und schwierig zu lösen. Wir schlagen deshalb eine Zerlegung in Teilprobleme vor, die nacheinander angegangen und gelöst werden. Die Zuteilung von D2D-Paaren zu Ressourcen und die anschließende Leistungskontrolle werden als Unterprobleme behandelt und gelöst. Die Zuweisung wird als bipartiter Graph dargestellt und durch den Khun-Munkres-Algorithmus (Hungarian Method) gelöst. Der äußere Polyblock-Algorithmus wird für die global optimale Leistungskontrolle verwendet. Dabei wird das Problem in ein monotones Optimierungsproblem über eine normale Nebenbedingungsmenge überführt und dann der Rand der Nebenbedingungsmenge durch Polyblöcke approximiert. In [JOR4] wird auch ein suboptimaler, jedoch weniger komplexer Algorithmus entwickelt und mit der global optimalen Lösung verglichen.

### 5.3 Weitere Arbeiten zur Ressourcen-Verteilung in zellularen Netzwerken

In [JOR1] werden Scheduling- und Ressourcen-Verteilungsalgorithmen für Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) Systeme betrachtet. Die gleichzeitige Mini-

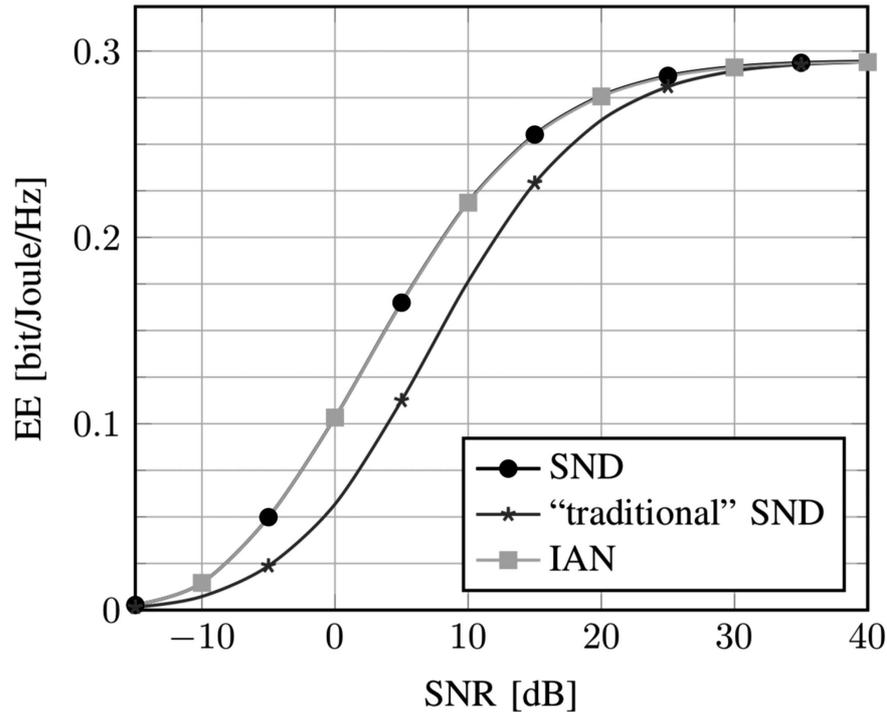


Abbildung 10: Energieeffizienz des Mehrwege-Relais-Kanals mit Amplify-and-forward relaying und 1) SND, 2) traditionellem SND, 3) IAN mit einer Präzision von 0.01

mierung der Verzögerungen bei der Datenzustellung und die Maximierung der Datenraten erfordert neue Algorithmen. Die geringen Latenzzeiten der Dienste für 5G- und zukünftige Netze werden auch in [JOR12] untersucht. Erreichbare Raten für Codes mit endlichen (kurzen) Blocklängen werden für Full-Duplex-Relais-Systeme optimiert. Die garantierte Dienstgüte in Relais-Netzwerken ist auch das Optimierungsziel der Arbeit [JOR3]. Die Energieeffizienz ist wichtigster Performance-Indikator in [JOR7]. Schließlich schlagen wir in [JOR10] vor, Techniken des maschinellen Lernens zu verwenden, um die Ressourcen-Verteilung in drahtlosen Interferenznetzwerken effizient zu lösen.