

Förderkennzeichen: **01BU0832**
Laufzeit des Vorhabens **01.04.2007 - 30.09.2010**
Zuwendungsempfänger: **Alcatel-Lucent Deutschland AG**
Vorhabensbezeichnung:

**Enablers for Ambient Services and Systems
Part C - Wide Area Coverage**

Schlussbericht Teile 1 und 2

Stuttgart, den 25. März 2011



Dr. Hans-Peter Mayer, Projektleiter

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01BU0832 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

1	AUFGABENSTELLUNG	4
2	VORAUSSETZUNGEN ZUR DURCHFÜHRUNG DER AUFGABEN	4
3	PLANUNG UND ABLAUF DES VORHABENS	6
4	STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK ZU PROJEKTBEGINN	7
4.1	Allgemeine Vorarbeiten zu MIMO-Verfahren (Thorsten)	7
4.2	Vorarbeiten in Projekten	8
4.3	Radio-Standards	8
5	ZUSAMMENARBEIT MIT ANDEREN STELLEN	10
5.1	EASY-C Workshops mit Partnern	10
5.2	Kooperationen mit Projektpartnern	10
5.3	Zusammenarbeit mit Unterauftragnehmern	11
5.3.1	Unterauftrag „Scheduling algorithm assessment“ an das Heinrich-Hertz Institut	11
5.3.2	Unterauftrag „LTE L1 MIMO Algorithms“ an das Heinrich-Hertz Institut	12
5.3.3	Implementierung des Test-Mobiles durch Signalion	12
5.3.4	Kanalmessungen für Relays durch das HHI	12
6	AUFZÄHLUNG DER WICHTIGSTEN WISSENSCHAFTLICH – TECHNISCHEN ERGEBNISSE UND ANDERER WESENTLICHER EREIGNISSE	12
7	VERWERTUNG DER ERZIELTEN ERGEBNISSE	40
8	FORTSCHRITTE AUF DEM GEBIET DES VORHABENS BEI ANDEREN STELLEN	42
9	ANLAGE: VERÖFFENTLICHUNGEN UND STANDARDISIERUNG	43
9.1	Veröffentlichungen	43
9.2	Beiträge zu 3GPP	45
10	ANLAGE: REFERENZEN UND ABKÜRZUNGEN	48
10.1	Referenzen	48
10.2	Abkürzungen	49

1 Aufgabenstellung

Ziel der Forschungsaktivitäten in EASY-C war, Schlüsseltechnologien für die nächste Generation von Mobilfunknetzen voranzubringen und die technologische Führungsrolle der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten auf dem Gebiet Mobilfunk in Deutschland zu stärken.

In den Jahren vor Projektbeginn war in den Mobilfunknetzen bereits ein deutlicher Anstieg der nachgefragten Nutzer-Datenraten verzeichnet worden, in 5 Jahren wurde eine Verzehnfachung beobachtet. Ein weiterer Anstieg des Bedarfs durch das mobile Internet war absehbar, der nur durch Einführung neuer Technologien gedeckt werden konnte.

Gleichzeitig war die Latenz der damals verfügbaren Systeme für viele Anwendungen nicht zufriedenstellend, sie lag bei über 80 ms für UMTS und über 150 ms für GPRS/EDGE. LTE sollte den Zielwert von 10 ms erreichen, auch die Folgesysteme sollten diesen Wert nicht wesentlich überschreiten.

Zu Projektbeginn waren Vorbereitungen für den neuen Mobilfunk-Standard 3GPP im Gange, dessen Kapazität die damals verfügbaren UMTS-Netze etwa verdreifachen sollte.

EASY-C sollte auf LTE aufbauen und durch Einführung erweiterter Mehrantennenverfahren wie Multi-user MIMO und insbesondere Network MIMO die verfügbare Kapazität nochmals um das 2,5 fache steigern, gegenüber UMTS sollte also insgesamt eine Verbesserung um der Datenraten um einen Faktor über 6 erzielt werden. Diese Verbesserung sollte insbesondere auch für den Zellrand gelten.

Für die Einführung einer neuen Technologie wie den MIMO-Verfahren in großem Maßstab, war ein gesicherter Nachweis der Funktion und der erzielbaren Gewinne zwingend erforderlich. Es musste gezeigt werden, dass die (MIMO-) Mehrantennensysteme oder die Mehrzellenkooperation im Feld funktionieren und Gewinne erzielen, um für diese zukunftssträchtigen Ideen die notwendige Akzeptanz in der Standardisierung zu erhalten.

Dies sollte durch Aufbau einer Feldtestumgebung gelöst werden, in der die neuen Konzepte unter realen Bedingungen erprobt, analysiert und bewertet werden konnten. Darauf aufbauend Modelle und neue Simulationstechniken für weitergehende Untersuchungen entwickelt werden.

Es sollte zunächst ein Versuchssystem als Referenz aufgebaut und charakterisiert werden, das dem entstehenden LTE Standard möglichst nahe kommen sollte. Auf dieser Referenz aufbauend sollten die neu zu entwickelnden Verfahren realisiert und vermessen werden.

2 Voraussetzungen zur Durchführung der Aufgaben

LTE Standardisierung

Wie oben beschrieben wurde als Ausgangspunkt und Referenz für die Untersuchungen der LTE Release 8 Standard gewählt, der sich zu Projektbeginn in einer frühen Phase der Standardisierung befand. Alternativ waren Ende 2006 / Anfang 2007 die beiden alternativen Standards WiMax und UMB in der allgemeinen Diskussion. WiMax war zu Projektbeginn von der reinen Definition her weiter fortgeschritten als LTE, allerdings setzte dieser Standard das 3GPP Systemdesign weniger nahtlos fort als das geplante LTE. Der UMB-Standard war hauptsächlich als Nachfolger von CDMA in Nordamerika gesehen, er spielte in Europa eine geringere Rolle.

Folglich wurde der LTE Standard als Basis gewählt. Eine Herausforderung für das Projekt bestand darin, dass der LTE-Standard bei Projektbeginn noch nicht festgelegt war, selbst wesentliche Grundzüge der Luftschnittstelle waren noch in der Diskussion bei 3GPP.

Diese Problematik wurde dadurch umgangen, dass bei Projektbeginn der Stand bei 3GPP analysiert und eine Spezifikation der Luftschnittstelle erstellt wurde, die den LTE Standard so genau als möglich vorwegnahm, und damit für LTE aussagekräftige Messungen zu einem frühen Zeitpunkt erlaubte.

Diese Spezifikation wurde innerhalb des Projekts EASY-C zur gemeinsamen Basis für eine Integration der LTE Basisstation von Alcatel-Lucent mit dem von Signalion entwickelten und gelieferten Mobile sowie für den Versuchsaufbau der TU Dresden.

Die erste Implementierung der Basisstation (Baseline) wurde in Teilen bereits vor Projektbeginn erstellt, so dass schon zu einem frühen Zeitpunkt dem Projekt ein funktionsfähiges System als Referenz zur Verfügung stand.

Für die Bewertung der Algorithmen im System und für eine Vorhersage der Gewinne wurde ein Systemsimulator für den LTE-Standard benötigt, der die Eigenschaften in einer Vielzell-Umgebung, insbesondere die Auswirkung der Interferenz aus den Nachbarzellen korrekt wiedergibt. Auch dieser Simulator stand zu Projektbeginn schon weitgehend zur Verfügung, er wurde den Aufgabenstellungen im Projekt entsprechend erweitert.

Für die Messungen im Labor und in der Feldtest-Umgebung wurden weitere Testgeräte wie zum Beispiel Spektrum Analysatoren für den LTE Standard benötigt, die bei Projektbeginn ebenfalls noch nicht zur Verfügung standen. In den meisten Fällen hatten die potentiellen Lieferanten noch keine Pläne für die Entwicklung der entsprechenden Produktlinien, da üblicherweise der Standard abgewartet wird. Hier konnte ein deutscher Hersteller für Testgeräte gewonnen werden, der auf Grundlage der für das Projekt erarbeiteten vorläufigen Spezifikationen erste Testlösungen etwa 18 Monate vor dem Wettbewerb zur Verfügung stellen konnte.

Für einen Test der MIMO- und COMP Verfahren in einer realen städtischen Umgebung wurde in zunächst eine Testumgebung in der südlichen Innenstadt von Dresden geplant. Diese bestand aus insgesamt 10 Standorten mit 28 Sektoren, die von den Projektpartnern Vodafone und Deutsche Telekom (damals T-Mobile) zur Verfügung gestellt wurden. Die Technische Universität Dresden stellte den benötigten Raum für die Steuerung der Experimente zur Verfügung und unterstützte die Logistik für die Versuchsdurchführung. Damit war ein Test mit mehreren Sektoren möglich, der auch Interferenz aus benachbarten Sektoren einschloss.

Für eine frühe Untersuchung der möglichen Gewinne durch COMP (Co-operative Multipoint Transmission and Reception) wurden weitere Verbindungen zwischen den Basisstations-Standorten benötigt, die möglichst wenig Beschränkungen hinsichtlich Bandbreite und Latenz aufweisen – also Faserverbindungen mit Datenraten von 2,5 Gb/s. Faserverbindungen konnten in Dresden nicht bereitgestellt werden, es bestand also Bedarf für Standorte mit Faseranbindung. Drei Standorte wurden in Berlin-Mitte gefunden, die Deutsche Telekom stellte in der Folge die Faserverbindungen bereit. Insgesamt entstand so in Berlin ein zweites Testbett mit drei Antennenstandorten auf dem Heinrich Hertz-Institut, der TU Berlin und auf dem Telekom-Hochhaus. Die Steuerung der Versuche geschah vom Heinrich-Hertz Institut aus.

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Organisation und der Ablauf der Arbeiten im Projekt folgten dem in Abbildung 1 wiedergegebenen Schema, wobei der linke Ast der Abbildung den Ablauf bei der Basisstation beschreibt, der rechte Ast für die Endgeräte gilt.

Basierend auf dem verfügbaren Stand der Technik sowie auf Vorarbeiten aus anderen Projekten wurden zunächst in einem ersten Schritt aussichtsreiche Algorithmen und Ansätze identifiziert, die in einem zweiten Schritt klassifiziert und in Simulationen untersucht wurden. Am Schluss der algorithmischen Arbeiten stand eine Auswahl der aussichtsreichsten Ansätze, für die eine experimentelle Überprüfung notwendig wurde.

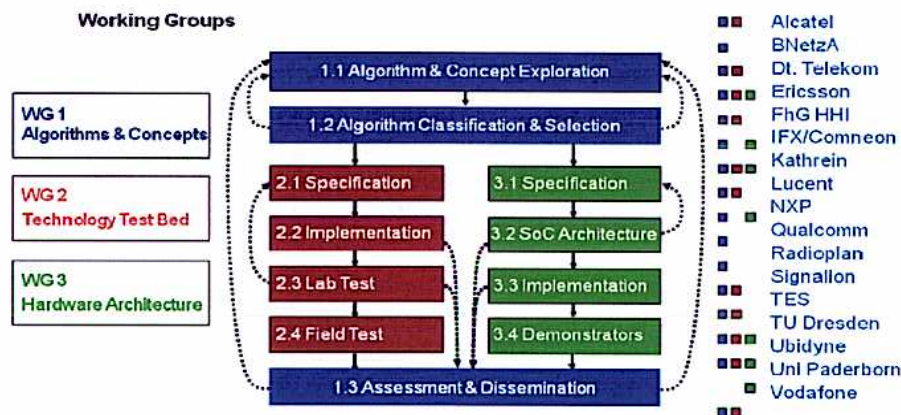


Abbildung 1: Geplanter Ablauf der Arbeiten in EASY-C

Die für eine experimentelle Überprüfung vorgesehenen Verfahren wurden zunächst in die Spezifikation des Systems, insbesondere derchnittstelle eingearbeitet. Mehrere Ansätze wurden zu „Sets of Algorithms“ (SoAs) gruppiert, um die Zahl der Spezifikationen und der Implementierungs- und Testläufe auf ein realisierbares Maß zu begrenzen. Insgesamt wurden so drei SoAs und vier Schritte im Ablauf der Spezifikationen im Projektzeitraum durchlaufen.

Nach Implementierung der spezifizierten Algorithmen auf Node B und Test Mobile und erfolgreichem Integrationstest des Zusammenspiels vom Basisstation und Testmobile wurden die Eigenschaften der Algorithmen zunächst in einer Laborumgebung untersucht. Parallel zur Implementierung wurden erweiterte Diagnose-Tools spezifiziert und entwickelt, die eine genaue Protokollierung und Zuordnung sowie die Analyse der im Versuch anfallenden Daten erlaubten. Dies geschah sowohl für die Basisstation als auch für das Test-Mobile.

In diesen Untersuchungen wurde der MIMO-Radiokanal durch Fadingemulatoren nachgebildet, was gegenüber den folgenden Feldtests den Vorteil einer höheren Reproduzierbarkeit der Messbedingungen bei gleichzeitig geringerem Aufwand hatte.

In dieser Phase konnten noch weitere Feinarbeiten ausgeführt werden, die verbleibende Abweichungen vom gewünschten Systemverhalten korrigierten.

Das so vorgetestete System wurde für die Feldtests bereitgestellt. Die einzelnen Kampagnen des Feldtests sind in Kap. 6 näher beschrieben. Die Versuche wurden in mehre-

ren Phasen ausgeführt: einer Planungsphase, in der das Ziel, der Versuchsablauf und die Parameter der Tests festgelegt wurden, gefolgt von einer operativen Vorbereitungsphase, in der die für die Tests notwendigen Aufbauten bereitgestellt wurden, ebenso wie Hilfsmittel wie Testfahrzeuge und Personal für die eigentliche Durchführung des Tests. In einer ersten Phase der Testausführung wurde die korrekte Funktion des Testaufbaus sichergestellt, das schließt die richtige Erfassung der Daten und die korrekte Einstellung der Versuchsparameter ein. Schließlich folgten die eigentlichen Testfahrten, mit einer ersten Analyse der Daten, gegebenenfalls Nachmessungen mit modifizierten Versuchsparametern und der abschließenden Auswertung.

In allen Phasen waren die Projektpartner vor Ort, also die TU für Dresden und das Heinrich-Hertz Institut für Berlin sowie die beiden Netzbetreiber eng eingebunden.

4 Stand der Wissenschaft und Technik zu Projektbeginn

4.1 Allgemeine Vorarbeiten zu MIMO-Verfahren

Der Begriff MIMO („Multiple Input Multiple Output“) wird heute für Mehrantennensysteme in einem breiten Kontext verwendet und beinhaltet eine große Vielfalt unterschiedlichster Verfahren zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Mobilfunksystemen.

In der Literatur ist die nutzbringende Verwendung mehrerer Antennenelemente auf Empfängerseite schon länger bekannt: [1] zielt auf Diversitätsgewinne ab, während [2] bereits Interferenzunterdrückung verwendet. Auch sendeseitig sind Strahlformungsverfahren („Beamforming“), z.B. [3], darauf ausgelegt das Signal- zu Rauschverhältnis (SNR) am Empfänger zu verbessern. Mit Raum-Zeit Blockcodierung [4] gibt es die Möglichkeit, auch ohne Kanalkenntnis am Sender Diversitätsgewinne zu erzielen.

Während die erwähnten Sendeverfahren die Kanalkapazität logarithmisch mit der Antennenanzahl steigern, wurde mit der Einführung des räumlichen Multiplex ein Durchbruch erzielt [5]: Im hohen SNR-Bereich steigt die Kapazität durch Raummultiplex linear mit der Zahl der Antennen. Dieses Prinzip wurde schrittweise auch auf MIMO Mehrbenutzersysteme ausgedehnt [24] - [29]

Informationstheoretisch wird die Abwärtsstrecke als „MIMO Broadcast Channel“ (MIMO-BC) bezeichnet, die Aufwärtsstrecke als „MIMO Multiple Access Channel“ (MIMO-MAC).

Zellulare Systeme können sich durch MIMO-Verfahren verbessern, bleiben jedoch interferenzbegrenzt durch Nachbarzellstörungen. Dies bewirkt eine sehr ungleiche Verteilung der erreichbaren Datenraten innerhalb der Zellen. Die Kooperation über mehrere Basisstationen hinweg geht dieses Problem an. Erste Schritte, die Abwärtsstrecke eines kooperativen Multizellsystems als verteiltes Antennensystem und damit als MIMO-BC Problem aufzufassen, finden sich in [6]. Weitergehende Gedanken, z.B. [7], entstehen jedoch gerade erst um den Projektbeginn von Easy-C herum.

Im neuen 3GPP Mobilfunkstandard LTE („Long term evolution“) werden Ende 2006 MIMO Verfahren diskutiert für den gerade zu entwerfenden Release 8. Als sendeseitige Diversitätsverfahren sind „cyclic delay diversity“ (CDD) und „space frequency block coding“ (SFBC) in Diskussion, wobei letzteres nach dem oben erwähnten Alamouti-Prinzip arbeitet. Diese Verfahren arbeiten ohne Kanalinformationen, d.h. „open loop“. Als „closed-loop“ Verfahren wird lineare Vorkodierung diskutiert, was eine Kombination aus Strahlformung und Raummultiplex leisten kann. Konkrete Verfahren sind Ende 2006 noch nicht fertig definiert.

4.2 Vorarbeiten in Projekten

Vorarbeiten in WINNER

Das von der EU im FP6 geförderte Projekt WINNER II, an dem Alcatel-Lucent beteiligt war, war zu EASY-C Beginn zu 50% seiner zweijährigen Laufzeit abgeschlossen. In WINNER II wurde bis Ende 2007 eine universelle, in weiten Grenzen konfigurierbare neue Luftschnittstelle für ein 4G System mit bis zu 100 MHz Bandbreite entworfen und spezifiziert. Kernpunkte sind OFDM-Modulation und die Unterstützung vielfältiger Mehr-Antennen-Verfahren. Ebenfalls enthalten sind Verfahren zur Minderung der Interzell-Interferenz bei Reuse-1 Systemen und Relaying-Konzepte. Ein komplettes 4G Systemkonzept mit speziellen Modi für Wide Area, Metropolitan Area und Short Range wurde erstellt und mit Ende-zu-Ende Simulationen validiert. Unser Schwerpunkt lag unter anderem auf Single User- (SU) und Multi User- (MU) MIMO- und Beamforming-Konzepten für unterschiedliche Antennenkonfigurationen. Speziell haben wir das Referenzschema für Wide-Area Multi-User Beamforming eingebracht. Als vielversprechend haben sich Kombinationen von Diversitäts- und Beamforming-Verfahren herausgestellt. Die Alcatel-Lucent Ziele für EASY-C bauen auf den vorhandenen WINNER-Arbeiten auf: Es wurden ausgewählte und entsprechend angepasste Mehrantennen-Verfahren auf ihre Einsetzbarkeit in EASY-C geprüft und im Demonstrator implementiert.

MIMOWA

Das Medea+ Projekt 2A 103 MIMOWA (Multiple Input Multiple Output Technologies for Wireless Access) beschäftigte sich mit der Spezifikation, Implementierung, Validierung und Demonstration von Algorithmen und Systemkonzepten mit Bezug auf das Mehrantennenkonzept MIMO (Multiple Input Multiple Output). Das europäische Verbundprojekt bezog in seine Studien die Funkstandards 3GPP Release 8 (LTE), IEEE 802.16e (WiMAX) und IEEE 802.11n (WiFi) mit ein. Das Projektziel war der Entwurf einfach zu implementierender und zwischen den Funkstandards austauschbarer Funktionsblöcke. MIMOWA begann am 01.01.2007 und endete am 30.06.2009 aus, d.h. die Laufzeit erstreckte sich weitestgehend parallel zu EASY-C. Das ermöglichte eine effektive Nutzung von Synergieeffekten. Generische Algorithmen und Systemkonzepte, die teilweise in MIMOWA erarbeitet wurden, konnten in EASY-C im Hinblick auf ihre Leistungsfähigkeit in Feldtests überprüft werden. In MIMOWA erzielte Kenntnisse sind auch in die EASY-C Simulationsmodelle mit eingeflossen.

Alcatel-Lucent untersuchte im Rahmen von MIMOWA Mehrantennenverfahren für die Funkstandards WiMAX und LTE. Dabei wurden zunächst Übertragungsverfahren und Feedbackmechanismen auf Link- und Systemebene simuliert und bewertet. Anschließend lag der Schwerpunkt auf der Optimierung von Umschaltkriterien zwischen verschiedenen Betriebszuständen entsprechend der Eigenschaften des Funkkanals. Außerdem wurden ausgewählte Link-Adaptions-Methoden auf die standardisierten Feedbackmechanismen abgestimmt um durch weitere Simulationen Aussagen zur Leistungsfähigkeit des realen Systems treffen zu können. Für WiMAX wurde ein MIMO-Labordemonstrator aufgebaut und das Umschalten zwischen den Betriebszuständen erfolgreich nachgewiesen.

4.3 Radio-Standards

LTE Definition / 3GPP Release 8 Stand Ende 2006

Die Definition von 3GPP LTE Release 8 hatte begonnen.

Erste Entwürfe von Spezifikationen der Luftschnittstelle waren bei Projektbeginn verfügbar und die grobe Ausrichtung beschlossen:

- Numerologie, FDD/TDD Duplex, DL Frame Struktur, Resource Block Definition

- Multiple Access Verfahren und Modulation Schemes (OFDM DL, SC-FDMA UL)
- Turbo Coding für Shared Channels
- Position der Cell-Specific Reference Signals, Synchronisation Signals und des Control Signallings im Downlink
- Position und Format für Random Access Channel

Weitergehende Implementierungsdetails wie die Definition von Modulation Coding Schemes, Transport Formate, Control Signalling und UL Frame Struktur waren weitgehend offen.

Basierend auf diesen Annahmen wurde die Luftschnittstelle der ALU Basisstation für LTE Prototyp spezifiziert, wobei eine Teilmenge der offenen Implementierungsdetails im Laufe der Zeit weiter an den Rel8 Standard angepasst wurde.

WIMAX Standard Stand Ende 2006

WiMAX ist die Abkürzung für Worldwide Interoperability for Microwave Access. Es ist ein Zertifizierungsgremium, das auf dem Funkstandard IEEE 802.16 (Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems) beruht. Das ursprüngliche Ziel bis 2004 war, einen Ersatz für drahtgebundene Verfahren wie Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) zu schaffen. Spätere Erweiterungen zwischen 2005 und 2006 (802.16e) führten unter anderem die Unterstützung von Mobilität ein. Damit wurde eine Alternative zu 3GPP Release 8 (LTE) geschaffen. Zu Projektbeginn wurde WiMAX von Intel, Alcatel-Lucent, Runcom und weiteren an breitbandigen Zugangsnetzen arbeitende Firmen vorangetrieben.

WiMAX beruht auf sehr ähnlichen Prinzipien wie LTE. Beide Standards verwenden zur Trennung der Nutzsignale Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM) und ermöglichen durch die Anwendung höherwertiger Modulationsverfahren (QPSK, 16-QAM und 64-QAM) sehr hohe Datenraten (bei WiMAX ca. 40-100 Mbit/s). Genau wie LTE unterstützt WiMAX auch Übertragungsverfahren mit mehreren Sende- und Empfangsantennen. Das Konzept der adaptiven Mehrantennensysteme beruht auf der Annahme, dass es je nach den Eigenschaften des Funkkanals vorteilhaft ist, die Antennen entweder zur Sicherung der Stabilität einer Verbindung durch Einfügen zusätzlicher Redundanz (Space Time Block Coding – STBC), oder zur Steigerung der Datenrate durch Raummultiplex einzusetzen. Darüber hinaus hat WiMAX von Anfang an sehr stark auf das Konzept Beamforming gesetzt. Dabei wird die Sendeleistung durch die Signalüberlagerung von kalibrierten Antennen gezielt in eine Raumrichtung abgestrahlt.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

5.1 EASY-C Workshops mit Partnern

Während des Easy C Projektes fanden in Abständen von jeweils ca. drei Monaten Treffen in Dresden oder Berlin statt. In der ersten Projektphase wurde bei den Meetings die Aufgabenteilung der Projektpartner für die vorgesehenen Simulations- und Trial-Aufgaben festgelegt. Für den geplanten Aufbau der Testumgebungen in Berlin und Dresden wurde die jeweilige Beteiligung der Projektpartner definiert und ein Arbeitsplan erstellt. Bei allen Meetings wurde dann der Status aller Projektpartner gegenüber der ursprünglichen Planung aufgezeigt und gegebenenfalls angepasst. In den nachfolgenden zwei Projektphasen wurde während der EASY-C Workshops die jeweiligen Ergebnisse bzw. Zwischenergebnisse der Simulationen von neuen Algorithmen und der durchgeführten Labor- und Feldtest von den jeweiligen Projektpartnern vorgestellt und im Forum konstruktiv diskutiert. Besonders für die erfolgreiche Durchführung der Feldtests in Berlin und Dresden war die gute und enge Abstimmung der Projektpartner bei diesen Meetings die notwendige Voraussetzung.

Die herausragenden Ergebnisse dieser Arbeiten wurden in der letzten Projektphase bei zwei EASY-C Public Workshops und während der ICC 2009 in Dresden vorgestellt.

Das Interesse an diesen Public Workshops war international und die Sichtbarkeit des Projektes ging weit über den ursprünglichen Fokus von EASY-C hinaus.

5.2 Kooperationen mit Projektpartnern

Kooperation mit Kathrein bei Feldtests

Für das Berliner Testbett, bei dem drei Standorten mit Glasfaserlinks verbunden wurden, hat sich die Firma Kathrein bereit erklärt, die abgesetzten Radio-Einheiten (Remote Radio Heads, RRH) bereitzustellen. Für den Bau der dazu notwendigen Schnittstelleneinheit in der Alcatel-Lucent eNodeB wurden die Spezifikationen der digitalen Schnittstelle zwischen der Basisbandeinheit der eNodeB und der Transmitter-/Receivereinheit des RRH mit Kathrein ausgetauscht. Eine erste Integration der Alcatel-Lucent eNodeB mit dem Kathrein RRH erfolgte wie geplant im 2. Quartal 2009. Bereits während der ICC in Dresden im Juni 2009 konnte ein 2Rx Macro Diversity Setup mit Kathrein RRH und der Alcatel-Lucent eNodeB mit einer onAir Demo ausgestellt werden. Ein Macro Diversity Aufbau mit Remote Radio Heads (RRH) von Kathrein und einer Alcatel-Lucent Basisstation wurde im Juli 2009 für die Uplink Makrodiversity Feldtest in Berlin gemeinsam mit Mitarbeitern von Kathrein und dem HHI installiert und getestet.

Kooperation mit dem Heinrich Hertz Institut bei Feldtests

Nach der erfolgreichen gemeinsamen Installation und Inbetriebnahme des Makro-Diversity-Feldtestaufbaus zusammen mit Kathrein und dem HHI wurde im Juli 2009 mit den Feldtest begonnen. Während insgesamt 5 Meßkampagnen im 2. Halbjahr 2009 und im 1. Halbjahr 2010 wurden Feldversuche mit Makrodiversity durchgeführt. Mitarbeiter

des HHI waren jeweils bei der Durchführung der Feldversuche beteiligt und haben den notwendigen Meßbus bereitgestellt.

Kooperation mit der TU Dresden bei Feldtests

Die von ALU erstellten Spezifikationen der Luftschnittstelle [8,9,10] wurden an TU Dresden weitergereicht und als Implementierungsgrundlage für das auf Signation-Komponenten beruhende EASY-C Testbett der TU Dresden verwendet.

Für die Feldtests im Testbett Dresden während des EASY C Projektes wurden Ende des 1. Halbjahr 2008 Drive-Routen südlich des Dresdener HBF festgelegt. In Zusammenarbeit mit der TUD wurden dann geeignete Standorte der Service-Provider Deutsche Telekom und Vodafone für Basisstationen und Störer ausgewählt und im 2. Halbjahr 2008 mit dem jeweils notwendigen Basisstations-Equipment aufgebaut. Die Alcatel-Lucent Basisstation mit 2.6 GHz Tranceivern wurde am Standort Hauptbahnhof installiert und zusammen mit der TUD in Betrieb genommen. Die von der TUD im Testbett Dresden installierten Störer an den Standorten HBF Süd und Lenneplatz wurden für die Feldversuche im Testbett Dresden eingesetzt. Die verschiedenen Sites wurden jeweils mit IP-Verbindungen zum „Operation Center“ auf dem TU Dresden Campus verbunden. Eine Workstation an der TUD wurde genutzt um die NodeB Kontrol-PC, Trace-PC und den ePower-switch fernzusteuern. Der PC hatte zusätzliche eine NAT Translation Funktion um eine Verbindung zum Internet herzustellen, und somit eine Verbindung zum ALU Netzwerk zu ermöglichen. Somit war es möglich die Funkstation und die Störer von einer zentralen Stelle dem „Operation Center“ zu konfigurieren und zu steuern. Während der Feldversuche konnten die Monitoring-Daten der eNodeB direkt im Kontrollzentrum ausgelesen und gespeichert werden. Bei den Feldversuchen in 2009 und 2010 mit Downlink SIMO, Uplink SIMO, Downlink SU MIMO, Uplink MU MIMO waren jeweils Mitarbeiter der TUD bei der Inbetriebnahme des Testumgebungen und der Versuchsdurchführung beteiligt.

5.3 Zusammenarbeit mit Unterauftragnehmern

Für einen Teil der Aufgaben im Projekt wurden Unteraufträge vergeben.

5.3.1 Unterauftrag „Scheduling algorithm assessment“ an das Heinrich-Hertz Institut

Ziele dieses im Zeitraum von Juli 2007 bis Juni 2009 beim Heinrich-Hertz Institut bearbeiteten Unterauftrags waren detaillierte Untersuchungen zur MAC-Schicht, insbesondere die

- Entwicklung effizienter, skalierbarer multi-user MIMO scheduling Verfahren „auf Basis von 3GPP UMTS long-term evolution (LTE)“
- Erweiterung und Anpassung einer MAC LTE Simulationsumgebung auf die Systemanforderungen im Rahmen von EASY-C
- Bewertung / Klassifizierung / Selektion von Scheduling Algorithmen bezüglich von im Rahmen von EASY-C definierten Leistungskennzahlen (Dienstgüte, Fairness, spektrale Effizienz, Skalierbarkeit, Komplexität, Implementierbarkeit)

Die Ergebnisse aus diesem Unterauftrag sind in Kap. 6 näher beschrieben

5.3.2 Unterauftrag „LTE L1 MIMO Algorithms“ an das Heinrich-Hertz Institut

Ziel dieses Unterauftrags war eine Untersuchung der in den Paketen SoA1 bis SoA3 definierten Algorithmen.. Die Performanz sollte soweit als möglich durch entsprechende (verfügbare und zu entwickelnde) Analysemethoden abgeschätzt werden. Von besonderem Interesse in diesem Zusammenhang waren das Zusammenspiel von verfügbarer Kanalkennntnis (z.B. welche Zeitgranularität etc.), räumliche, zeitliche und spektrale Korrelationseigenschaften des Kanals sowie den gewählten Übertragungsstrategien. Hierbei erfolgte eine Gruppierung der Algorithmen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit für unterschiedliche Szenarien (Systemlast etc.) und des Implementierungsaufwandes. Eine entsprechende Link-Level Simulationsumgebung wurde aufgebaut, eine System-simulationsumgebung wurde dem HHI zur Verfügung gestellt.

Nach Definition geeigneter Referenzszenarien wurden die Algorithmen in der bestehenden und der geeignet erweiterten System-Simulationsumgebung bewertet, dabei fanden begleitende Untersuchungen der zu betrachteten Metriken und verwendeten Blockfehlergeneratoren statt

5.3.3 Implementierung des Test-Mobiles durch Signalion

Die Umsetzung von MIMO- Verfahren und ihre Implementierung für das Test-Mobile wurde als Unterauftrag an die Firma Signalion vergeben. Weiter beinhaltete der Auftrag anteilige Arbeiten bei der Integration des Gesamtsystems. Als Grundlage für die Arbeiten dienten die in Kapitel 3 erwähnten und in Kap. 6.x näher beschriebenen Spezifikationen von Alcatel-Lucent.

Es wurde mit diesem Auftrag auf einen Software-Stand bei der Basisstation und Test-Mobile aufgebaut, der bereits einen Betrieb des Systems mit ersten MIMO-Features erlaubte, die arbeiten konzentrierten sich im Wesentlichen auf das Jahr 2009.

5.3.4 Kanalmessungen für Relays durch das HHI

In Zusammenarbeit mit HHI Berlin im Rahmen eines Unterauftrags wurden zwei Kampagnen zur Messung der Downlink Übertragungskänale für Relay-Knoten durchgeführt, eine erste zur Messung der Backhaul Links von eNB zum Relay-Knoten und eine zweite Kampagne zur Messung der Access Links vom Relay-Knoten zum Endgerät Die Veröffentlichung der Ergebnisse ist geplant.

Testumgebung

Beide Messkampagnen wurden auf dem Campus der TU Berlin durchgeführt und ein Relay-Knoten wurde an mehreren Positionen in das makrozellulare EASY-C Testbett eingebracht, um ein realistisches Inter-Zell Interferenz-Szenario zu emulieren. Der Campus ähnelt einer dichten urbanen Umgebung mit enger Bebauung und heterogenen Gebäudehöhen und Baumaterialien.

6 Aufzählung der wichtigsten wissenschaftlich – technischen Ergebnisse und anderer wesentlicher Ereignisse

AG 1: Algorithmen und Konzepte

AP1.1: Algorithmen Konzepte und Evaluierung

SubWG1: Requirements

Als Grundlage für EASY-C wurde zu Projektbeginn eine Definition der Leistungsindikatoren (Key Performance Indexes, KPI) erarbeitet und in [12] dokumentiert, anhand derer später die Leistungsfähigkeit der untersuchten Algorithmen im Rahmen von Simulationen, Labortests und Feldtests bewertet werden sollten. Die Gesamtprojektziele wurden dann anhand von Anforderungen an die zu erreichende Steigerung der Leistungsindikatoren in Bezug auf ein ebenfalls definiertes Referenzszenario festgelegt. Alcatel-Lucent hat bei den technischen KPIs Fairness, Durchsatz pro User (insbesondere am Zellrand) und spektrale Effizienz, die konsistent zu 3GPP definiert wurden, wie auch beim Referenzszenario, das bzgl. der definierten KPIs dem heute als Rel-8 in 3GPP spezifiziertem LTE-System entspricht, beigetragen.

AP1.2 Algorithmen Klassifikation & Selektion

Wie in Kapitel 3 beschrieben, wurden die nach ersten Simulationen und Bewertung für eine nähere Untersuchung ausgewählten Algorithmen in „Sets of Algorithms“ (SoA) gruppiert, die dann in Simulationen und Tests näher untersucht wurden.

SoA – 1 war als Satz von Basis-Algorithmen entworfen worden, d.h. er bestand aus einer vollständigen Implementierung der DL/UL PHY/MAC-Übertragungskette, jedoch zunächst ohne MIMO Erweiterungen. Eine Übertragung mit einem einzelnen Datenstrom und einem aufwandsgünstigen MAC-Scheduler war vorgesehen.

Mit einer Implementierung dieses Algorithmenstandes wurden die grundlegenden Messungen zur LTE-Baseline durchgeführt die in die Proof-of-Concept Phase bei der LTE/SAE Trial Initiative (LSTI) - einem Vor-Standardisierungsgremium eingebracht werden konnten.

SoA2 enthielt die Algorithmen einer abgeschlossenen LTE Spezifikation einschließlich MIMO. Dazu gehört Single- und Multi-User MIMO im Downlink und Multi-User MIMO im Uplink. Ein entsprechender MAC-Scheduler, der die MIMO-Übertragung berücksichtigt und optimal ausnutzt, muss entworfen und getestet werden. Statische Inter-Zell Interferenzkoordinationsverfahren wurden betrachtet und die Wechselwirkung mit dem Mac-Scheduler in Hinblick auf Leistungs/Dienstgüteverbesserung insbesondere am Zellrand wurde hier untersucht.

Die Feldtests bauten um wesentlichen auf diesen Stand des Algorithmenpaketes auf, zusätzlich wurden Erweiterungen für die Tests von COMP im Uplink sowie Multi-User MIMO im Uplink mit SIC (Successive Interference Cancellation) Receiver vorgenommen siehe AP2.4 in Kapitel 6.

SoA3 bestand aus Algorithmen die deutlich über LTE Release 8 mit Ausrichtung auf Systemleistungsoptimierung. Neben kooperativen multi-zellulären MIMO-Algorithmen wurden auch optimierte semi-statische Verfahren zum verteilten Radio Ressource Management im Fokus der Klassifikation und Selektion.

AP1.3: Bewertung der Systemleistung und Verbreitung der Ergebnisse

Systemsimulation Downlink Coordinated Beamforming

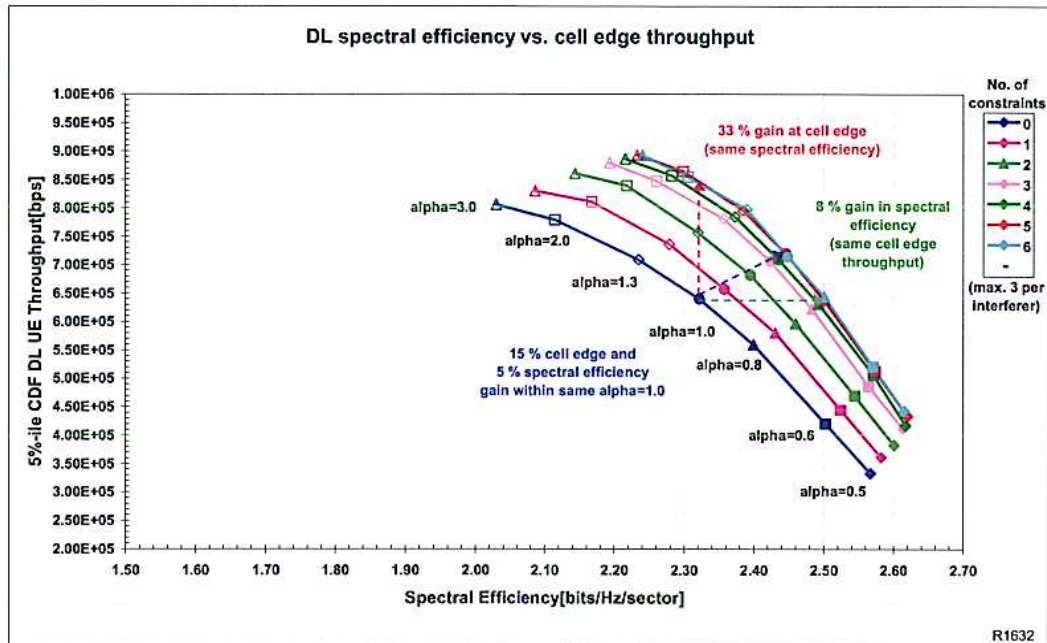


Abbildung 2: Zellranddurchsatz versus spektraler Effizienz von Downlink Coordinated Beamforming im SU-MIMO-Fall für das Szenario 3GPP SCME Case 1 (500 m ISD, 3 km/h) und die Antennenkonfiguration 4x2 V-pol. mit $\lambda/2$ -Abständen.

Das Verfahren „cyclically prioritized coordinated scheduling with worst/best companion reporting“ [13, 14] setzt das Konzept der Beamkoordination zur Interferenzverringern verteilt ohne zentralen Koordinator um. Die Koordination basiert auf impliziter Kanalkenntnis in Form von „worst companions“ [15], mit denen UEs die am stärksten interferierenden Beams der Nachbarzellen zusammen mit einem möglichen Gewinn, für den Fall dass diese Beams durch Koordination unterdrückt werden würden, mitteilen.

Das Verfahren wurde für urbane Szenarien simulativ untersucht. Abbildung 2 zeigt exemplarisch die Gewinne für 4 korrelierte Antennen im 3GPP-Szenario. Für nur 2 korrelierte Antennen werden die Beams breiter und die Gewinne halbieren sich in etwa.

In einem zweiten Schritt wurde das Verfahren auf MU-MIMO erweitert. UEs werden nur mit dem von ihnen jeweils berichteten „best companion“ gepaart werden und auch nur dann, wenn gegenüber SU-MIMO insgesamt eine Verbesserung erreicht wird. Im Ergebnis erzielt MU-MIMO eine um 30 % höhere spektrale Effizienz als SU-MIMO. Beamkoordination bringt für MU-MIMO einen kaum signifikanten Gewinn von wenigen Prozent. Beamkoordination auf Basis des „best companion“ Reporting vermag also bereits allein die vorhandene räumliche Diversität weitgehend auszunutzen.

Uplink Link Level Simulationen

Für die Bewertungen der verschiedenen in diesem Projekt untersuchten Algorithmen wurde eine Link Level Simulationskette aufgebaut. In Link Level Simulationen für den LTE Uplink wurden verschiedene Algorithmen zur Unterdrückung der Interferenz im Empfänger untersucht. Dabei betrachtet man zuerst nur eine Zelle und genau definierte Störer, um zu ersten Bewertungen für die Leistungsfähigkeit der Algorithmen zu kommen. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Bewertung der Algorithmen ist neben ihrer Leistungsfähigkeit auch ihre Komplexität, die im Laufe der Untersuchung abgeschätzt

wurde. Erfolgversprechende Algorithmen, die von der Komplexität her realisierbar scheinen, wurden anschließend in eine multi-link Simulation implementiert und untersucht. Dadurch erhält man belastbare Aussagen über die durchschnittlichen Gewinne. Zur weiteren Untersuchung wurden vereinfachte Modelle für ausgewählten Empfängertypen erstellt, die in einer Systemsimulation eingesetzt werden.

Unter anderem wurde auch der sogenannte Successive Interference Cancellation (SIC) Empfänger Algorithmus untersucht und mit den bisher eingesetzten Empfängern verglichen. In Abbildung 3 sind die verbesserten Durchsätze bei gleicher Kanalbedingung aufgetragen. In Abhängigkeit von der Kanalkodierung ergeben sich hiermit Verbesserungen von bis zu 3dB.

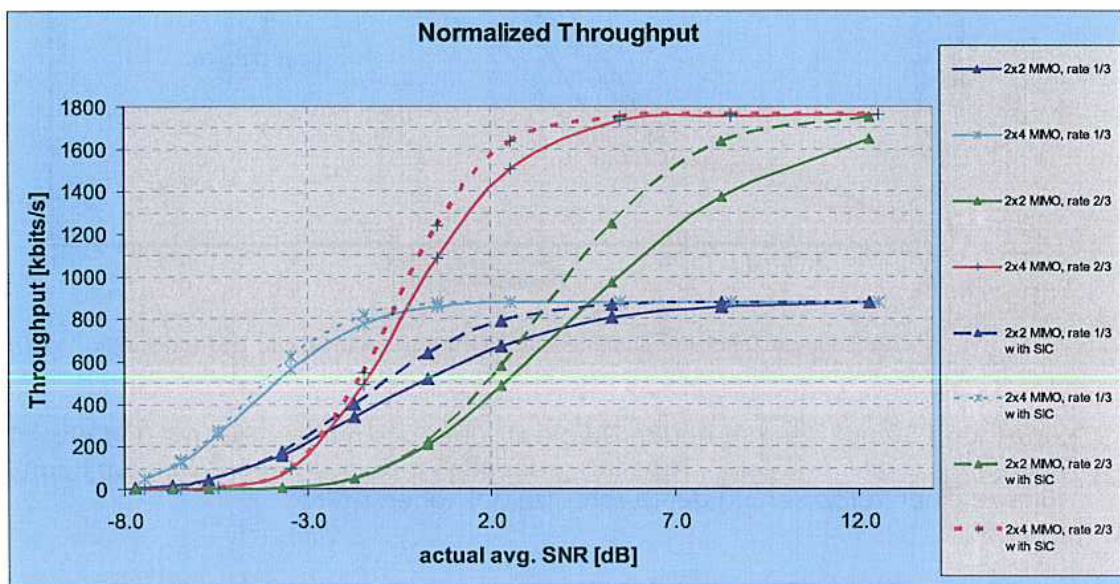


Abbildung 3: Durchsatzverbesserung bei gleicher Kanalbedingung bei Nutzung eines MMSE-SIC Empfängers im Vergleich zu einem MMSE Empfänger. Gewinne hängen von der Kanalkodierung ab.

Unterauftrag „LTE L1 MIMO Algorithms“ am HHI

Link Level Simulationen für Downlink MU-MIMO für ein Lineares Array mit vier Antennenelementen wurden durchgeführt, insb. im Hinblick auf folgende Szenarien:

- Vergleich von Space Division Multiple Access (SDMA) und Zero Forcing Beamforming (ZFBF),
- Einfluss von Tapering, d.h. Reduktion der Sendeleistung der äußeren Antennenelemente des Arrays,
- Vergleich verschiedener Code-Bücher,
- Best/Worst Companion Feedback Analyse,
- Rate Approximation mit beschränktem Feedback.

Die Simulationen wurden durchgeführt mit dem SCME Urban Macro Kanalmodell für 5MHz Systembandbreite. Die Endgeräte haben eine Empfangsantenne und bewegen sich mit einer Geschwindigkeit von 30km/h. Zwei Endgeräte werden simultan auf den gleichen Radio-Ressourcen bedient.

Abbildung 4 zeigt den simulierten Durchsatz über das mittlere SNR mit ZFBF und SDMA. Man erkennt, dass mit Zero-Forcing Gewinne gegenüber SDMA erzielt werden können, vor allem bei gutem SNR, bei dem höherstufige Modulationsverfahren (16-QAM, 64-QAM) eingesetzt werden können.

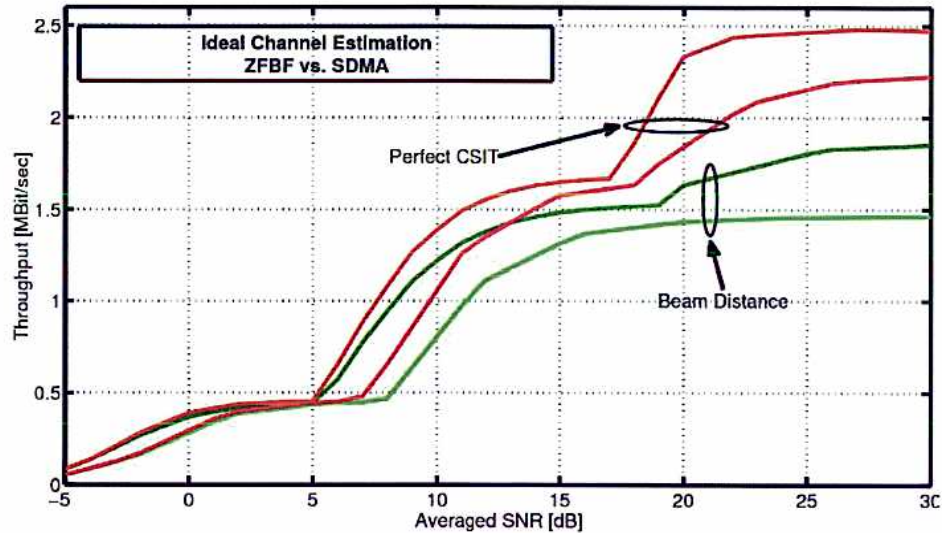


Abbildung 4: Durchsatz über mittleres SNR mit SDMA (hell) und ZFBF (dunkel).

Abbildung 5 zeigt den simulierten Durchsatz über das mittlere SNR mit und ohne Tapering für ein 3-bit Code-Buch. Tapering reduziert das Übersprechen zwischen Beams und führt zu einer Verbesserung der Durchsätze bei höherem SNR.

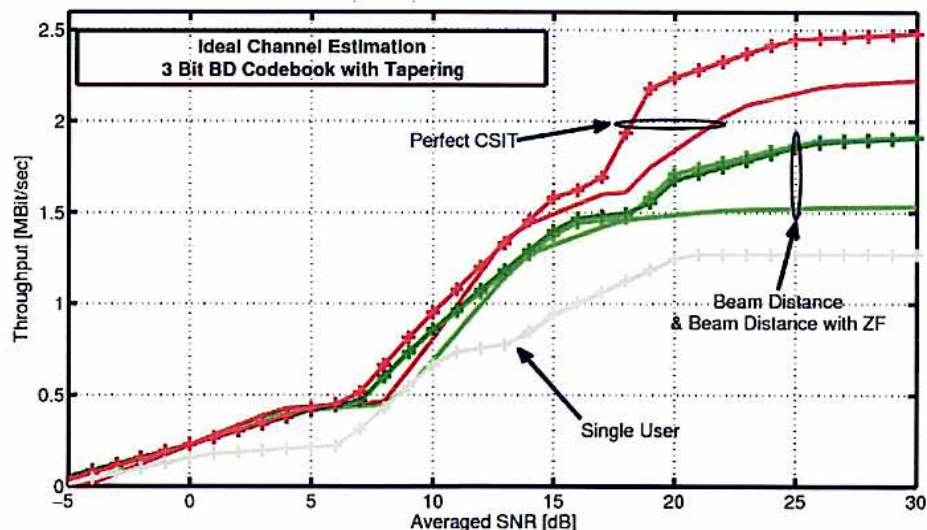


Abbildung 5: Durchsatz über mittleres SNR mit einem 3bit Code-Buch mit (+) und ohne Tapering.

Abbildung 6 zeigt den simulierten Durchsatz über das mittlere SNR mit und ohne Tapering für 3-bit und 4-bit Code-Bücher. Geeignetes Code-Buch-Design ist notwendig um vor allem bei gutem SNR und hohen Modulationsverfahren eine Steigerung des Systemdurchsatzes erzielen zu können.

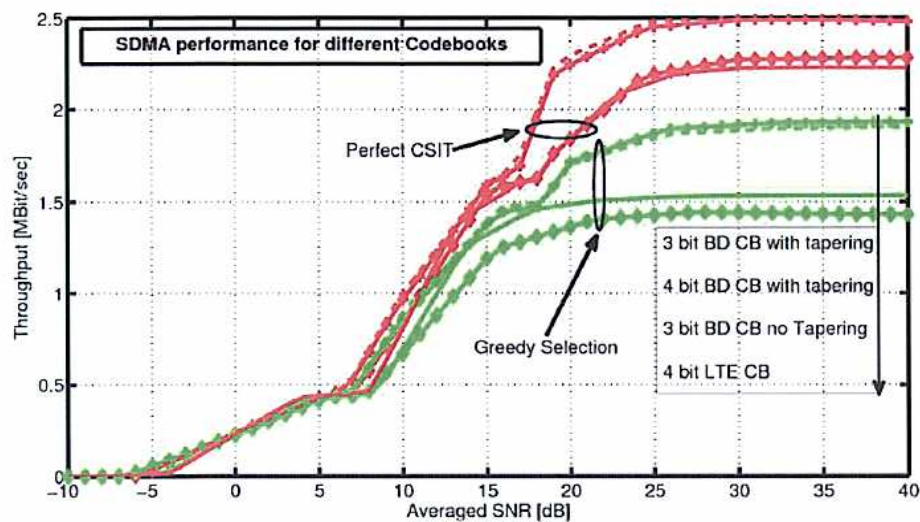


Abbildung 6: Durchsatz über mittleres SNR mit 3bit und 4bit Code-Büchern mit und ohne Tapering.

Unterauftrag „Scheduling algorithm assessment“ an das Heinrich-Hertz Institut

Ziel der ersten Phase der Kooperation war die Leistungsfähigkeit eines zentralisierten, kooperative arbeitenden Schedulers zu bewerten, der die Strahlformung bei benachbarten Sektoren koordiniert.

Für die Untersuchung wurde zunächst der von Alcatel-Lucent bereitgestellte System Simulator modifiziert dann Simulationsläufe durchgeführt.

Zunächst wurden für SDMA/MU-MIMO Betrieb ein Vergleich zwischen LTE-Codebuch und optimiertem Codebuch ohne Berücksichtigung von Koordination angestellt. Das Ergebnis war, dass mit optimierten Codebüchern eine um ca. 10% höhere spektrale Effizienz erzielbar ist.

Es wurde anschließend eine Strategie für kooperatives score-basiertes scheduling für den intra-site Fall entworfen, der auf Vermeidung von Kollisionen zwischen Beams benachbarter Sektoren beruht. Systemsimulationen, die mit diesen Scheduling-Verfahren durchgeführt wurden, zeigten jedoch keine signifikanten Gewinne bei Koordination zwischen den Sektoren. Dies gilt auch bei Variation der horizontalen Öffnungswinkels der Antenne:

Wird eine Antenne mit 70° Öffnungswinkel statt 90° eingesetzt, dann erhöht sich die spektrale Effizienz um ca. 5%, dies geht jedoch mit einem 10% igen Verlust am Zellrand (5%ile) einher. Weitergehende statistische Untersuchungen der Kollisionswahrscheinlichkeiten zwischen den Beams verschiedener Zellen ergaben keine signifikanten Muster, was das Systemverhalten erklärt.

Die Folgerung aus den Untersuchungen und den geringen erzielten Gewinnen war, dass ein UE spezifisches reporting benötigt wird, das auch die Koordination benachbarter Sektoren verschiedener Basisstationen unterstützt. Deshalb wurden die Arbeiten in der Folge auf die Untersuchung effizienter Verfahren zum Kanal-Feedback fokussiert.

Kalibration der System-Simulatoren

Für die Leistungsbewertung der in Easy-C zu entwickelnden Algorithmen und Systemverbesserungen waren umfangreiche und komplexe Systemsimulationen erforderlich. Die ersten Algorithmenbewertungen basieren dabei am Anfang auf detaillierten Link-Level-Simulationen. Für spätere vergleichende Studien wurde ein Systemsimulator aufgebaut. Diesem Simulator liegt die, innerhalb der Unterarbeitsgruppe Simulation in Easy-C festgelegte Simulationsmethodik zu Grunde. Von allen Partnern wurde jeweils eine Referenzkonfiguration dieses Simulators implementiert um die Simulationsergebnisse eines Satzes von Referenz-Eingangsparametern zu vergleichen und damit die Simulatoren zu kalibrieren.

Um eine Vergleichbarkeit der Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen der Feldtestmessungen zu erreichen wurde eine zweite Simulationsmethode definiert. Hierbei sollen die üblicherweise in Systemsimulatoren verwendeten empirischen Kanalmodelle durch von Projektpartnern gemessene Kanaldaten ersetzt werden. Hierzu werden Sounding Messungen auf vordefinierten Trajektorien im Feldtestgebiet durchgeführt.

Simulationen SDMA / Grid of Beams / SU MIMO

SDMA basierend auf grid-of-fixed beams: Das in AP1.1 entwickelte Verfahren wurde mit dem LTE Release 8 Verfahren in Systemsimulationen verglichen. Mit den EASY-C Referenzparametern und einer sub-optimalen „greedy“ Strategie zur Nutzerpaarung ergibt sich ein Gewinn in spektraler Effizienz von 2.3 bit/s/Hz auf 2.6 bit/s/Hz bei gleichem Zellranddurchsatz.

Koordiniertes Beamforming innerhalb einer e-Node B. Das in AP1.1 entwickelte Verfahren wurde für unterschiedliche Antennencharakteristika (70/90 Grad Halbwertsbreite des Strahls) und einer sub-optimalen „greedy“ Strategie zur Nutzerpaarung verglichen. Es ergeben sich bei gleicher spektraler Effizienz geringe (< 10%) Gewinne für den beobachteten Zellranddurchsatz.

Erweitertes 4x2 SU-MIMO mit kompakter zweizeilig kreuzpolarisierter Antennenkonfiguration. Das in AP1.1 entwickelte Verfahren wurde mit LTE Release 8 in Systemsimulationen verglichen und zeigte Gewinne sowohl in spektraler Effizienz, wie auch Zellranddurchsatz.

Downlink koordiniertes Beamforming: Als ein dynamisches Koordinierungsverfahren zur Interzellinterferenzvermeidung wurde Beamkoordinierung auf Basis der sogenannten Best/Worst Companion-Feedback-Signalisierung untersucht. Erste Systemsimulationen ohne Einbeziehung von komplexeren Scheduling-Algorithmen zeigten Gewinne von etwa 40% beim Zellranddurchsatz.

Downlink koordiniertes Beamforming im Multizellbetrieb: Ein einfaches, zellübergreifendes, vollständig verteilt arbeitendes koordiniertes Beamforming-Verfahren wurde in Systemsimulationen evaluiert. Das Verfahren nutzt das "worst companion" Precoding Matrix Identifier (PMI) feedback der UEs, wie es für die Standardisierung vorgeschlagen wurde. Es wurden Gewinne von 25 % am Zellrand erzielt.

Rate Approximation Verfahren für den COMP-Fall: Das bisher im wesentlichen nur für eine isolierte Zelle betrachtete "Rate Approximation"-Verfahren für die Kanalarückmeldung im Multiuser-MIMO-Betrieb wurde für erweiterte Szenarien untersucht, bei denen die Teilnehmer von mehreren Basisstationen gleichzeitig versorgt werden. Im Detail wurde dabei der Fall der kooperativen Versorgung von den drei Zellen eines Standortes

mit der Versorgung dreier gegenüberliegender Zellen verschiedener Basisstations-Standorte verglichen. Gewinne für den Rate Approximation-Ansatz ergeben sich hauptsächlich für den letzteren Fall. Es zeigte sich, dass "Rate Approximation" besonders im Zusammenspiel von Codebook-basiertem Feedback der Kanalinformation bei begrenzter Feedback-Datenrate deutliche Vorteile gegenüber anderen Verfahren aufweist.

Simulation von COMP im Uplink

Ziel der dieser Aktivitäten war es das theoretische Potenzial des kooperativen Empfangs in Uplink durch Simulationen an Modellsystemen quantitativ zu untermauern. Aufgrund der Sendeleistungsbeschränkung von Nutzerterminals gab es bisher ein nicht unerhebliches Ungleichgewicht in der Datenübertragungsrate zwischen Uplink und Downlink. Deshalb wurde besonderen Wert darauf gelegt, zu untersuchen, inwiefern sich durch einen kooperativen Empfang der Datendurchsatz von Nutzern, die sich in einem Zellrandgebiet aufhalten, steigern lässt.

Um die Fragestellungen zu beantworten, wurde in der ersten Phase eine Simulationssoftware entwickelt, die im Funktionsumfang alle Anforderungen erfüllt, um gemäß den Richtlinien von 3GPP und ITU konform zu sein. Diese Vorgaben sind im Detail in den entsprechenden Dokumenten von 3GPP (TR 36.814) und ITU-R (M.2135) beschrieben. Konkret bedeutete dies insbesondere, dass gemäß der Standardisierung Platzierungs-, Mobilitäts- und Kanalmodelle implementiert wurden. Anhand von sogenannten Geometrie-Messungen wurde sorgfältig überprüft, ob die von uns realisierte Simulationssoftware den Erwartungen der Standardisierung entspricht. Ergebnis: Der von uns entwickelte Simulator erfüllt innerhalb der Fehlergrenzen allen Vorgaben.

In der darauf aufbauenden zweiten Phase konnten dann proprietäre Komponenten entwickelt und erforscht werden. Von besonderer Wichtigkeit ist hierbei die Kontrolle der Sendeleistung der Nutzerterminals, da hiervon entscheidend die Batterielebensdauer abhängt. In Rahmen dieser Arbeit wurde deshalb eine Leistungskontrolle entwickelt, die auf einer relativ langsamen zeitlichen Anpassung der Regelparameter beruht. In unserem Fall wird die Leistungskontrolle derart realisiert, dass alle Nutzer innerhalb einer Zelle mit möglichst derselben spektralen Leistungsdichte empfangen werden. Diese Empfangsleistungsdichte wird zellspezifisch derart geregelt, dass aus der Sicht des Gesamtsystems ein vorgegebenes Interferenzniveau mit kleiner Varianz erzielt wird. Es hat sich gezeigt, dass der optimale Arbeitspunkt im Allgemeinen sehr stark vom konkret untersuchten Szenario abhängt und muss in der Regel in simulativen Voruntersuchungen bestimmt werden. Andererseits hat sich deutlich gezeigt, dass die Leistungskennzahlen des Systems eine relativ gutmütige Abhängigkeit von der Interferenz zeigen. In dem von uns besonders betrachteten Szenario (Urban-macro) hat sich ein Interferenzniveau von 18dB oberhalb des thermischen und technischen Hintergrundrauschens als eine gute Wahl erwiesen. Als eine weitere wichtige Komponente wurde ein raten-fairer Scheduler entwickelt. Raten-fairness bedeutet hierbei, dass der Scheduler versucht, im Mittel jedem Nutzer dieselbe Anzahl an physikalischen Übertragungseinheiten zuzuteilen. Im Rahmen von LTE spricht man in diesem Zusammenhang auch von sog. physikalischen Ressourcenblöcken in der Zeit- und Frequenzdomäne. Der Scheduler berücksichtigt auch Nutzerterminal spezifische Einschränkungen z.B. bezüglich der zur Verfügung stehenden Sendeleistung. Die Zuteilung der Ressourcen erfolgt pro Zelle, d.h. ein Nutzerterminal erhält von derjenigen Zelle Ressourcen zugeteilt, zu der es den geringsten mittleren Ausbreitungsverlust hat. Die Wahl des geeignetsten Modulationsverfahren und der Codierungsrate eines in Uplink übertragenen Transportblockes wurde nach dem kooperativen Empfang mit dem gemessenen Signal-zu-

Rauschverhältnisses vorgenommen (sog. post-link adaption), wobei eine 30 %-ige Übertragungsfehlerwahrscheinlichkeit in der Auswahl des Transportformates berücksichtigt wurde. Zentraler Bestandteil der Simulationssoftware war die Realisierung eines kooperativen Empfängers. Kooperativer Empfang bedeutet hierbei, dass man die Antennenanordnungen mehrerer Zellen derart logisch zusammenführt, dass man letztlich effektiv eine große Antennenanordnung vorliegen hat. Implementiert wurde der Empfänger nach dem Prinzip des Minimum-Squared Error Prinzips mit der Fähigkeit starke Gleichkanalstörer durch geeignete Wahl der komplexen Empfangsgewichte selektiv zu unterdrücken. In dieser Arbeit wurde angenommen, dass die Kanalkoeffizienten fehlerfrei vom Empfänger bestimmt werden können und dass keine zeitlichen Verzögerungen beim Austausch von Empfangsinformation zwischen Basisstationen auftreten. Das nach dem Empfänger gemessene Signal-zu-Rauschverhältnis wurde verwendet um a) mit Hilfe der post-link Adaption das Transportformat festzulegen und b) zu entscheiden ob ein empfangener Transportblock erfolgreich übertragen worden ist oder nicht. In den simulativen Arbeiten wurde ein synchroner Hybrid-Automatic-Repeat-Request (HARQ) wurde explizit mit bis zu 6 Prozessen und bis zu 3 Wiederholungen des Übertragungsvorganges eines Transportblockes berücksichtigt.

In der dritten Phase des Teilprojekts wurde das Potential eines kooperativen Empfangs in Uplink simulativ untersucht. Die Abbildung 7 stellt beispielhaft die aus den Simulationen gewonnenen Leistungszahlen für eine unterschiedliche Anzahl miteinander kooperierender Zellen dar. Das Szenario war eine urbane Umgebung (UMa) mit einer Sende- und 4 Empfangsantennen pro Zelle (SIMO 1x4). Zum Vergleich wurden auch Resultate aus Release 8 (SIMO 1x4, UMa) bzw. die Anforderung der ITU in das Diagramm mit aufgenommen. Anhand der Resultate lässt sich deutlich erkennen, dass die Vorgaben aus Release 8 und der ITU auch ohne den Einsatz kooperativer Empfangstechniken deutlich übertroffen werden können. Mit zunehmender Anzahl kooperierender Zellen nimmt sowohl die spektrale Effizienz einer Zelle- als auch die eines Zellrand-Nutzers deutlich zu. Generell kann beobachtet werden, dass es in der Regel nur einer relativ kleinen Anzahl kooperativer Zellen bedarf, um den hauptsächlichen Zugewinn an spektraler Effizienz zu erzielen (Abbildung 8). Der Leistungszugewinn sättigt mit zunehmender Anzahl kooperierender Zellen, weil man letztlich bezüglich der Modulations- und Codierungsraten nach oben hin beschränkt ist.

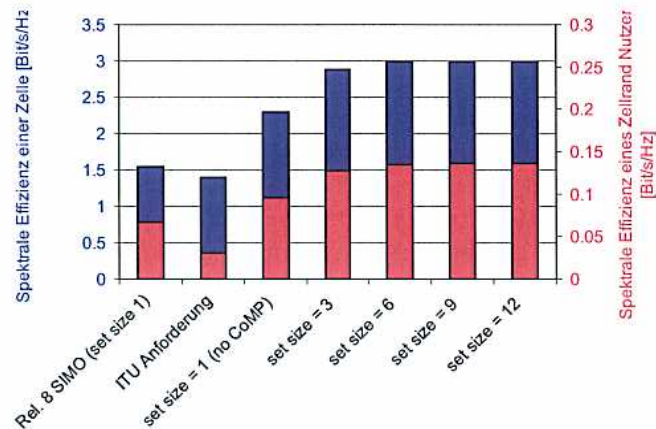


Abbildung 7 : Spektrale Effizienz für die Zelle (blaue Balken, linke Ordinate) und Nutzer am Zellrand (rote Balken, rechte Ordinate) als Funktion der Anzahl kooperierender Zellen (set size). Zum Vergleich ebenfalls dargestellt sind die durchschnittlichen Erwartungen für ein Release 8 System und die ITU Mindestanforderung ohne kooperativen Empfang.

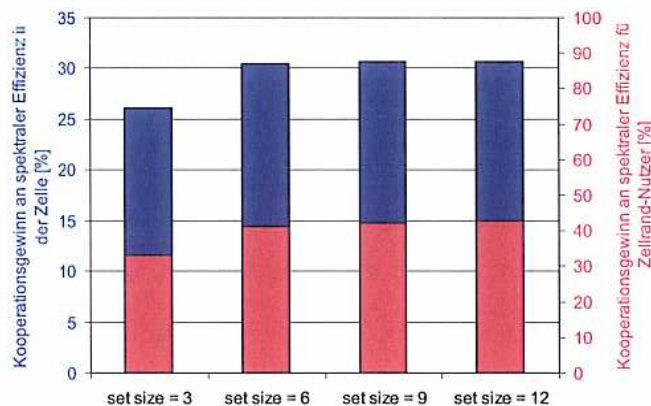


Abbildung 8: Gewinn an spektraler Effizienz in der Zelle und Zellrand-Nutzer in Abhängigkeit der Anzahl kooperierender Zellen im Vergleich zu einem System ohne Kooperation.

Abschließend lässt sich anhand der von uns simulativ erzielten Resultate sagen, dass kooperativer Empfang in Uplink eine äußerst attraktive Technologie zur Steigerung der Leistungsfähigkeit eines Mobilfunksystems ist und noch ein großes für zukünftige Innovationen birgt.

Untersuchungen zum Rate Approximation Verfahren (HHI)

Das Rate-Approximation-Verfahren wurde speziell zur Verbesserung der spektralen Effizienz und des Zellrand-Durchsatzes von **Multi-User-MIMO**-Übertragungen entwickelt. Die

im Projekt festgestellte Tatsache, dass in unkoordinierten Grid-of Beams-Szenarien mit Adaptionen der Packet Scheduler alleine keine weitere Verbesserung zu erzielen war, führte zu Überlegungen, das Feedback als solches in geeigneter Weise zu modifizieren. Beim Rate Approximation Verfahren wird dabei der Basis-Station Information über die erreichbaren Summenraten aller möglichen Nutzerpaarungen zur Verfügung gestellt, die dann für die optimale Nutzerauswahl durch die Packet Scheduler mit berücksichtigt wird. Ziel dabei war es, die dazu erforderliche Feedback-Datenrate möglichst gering zu halten, ohne durch die dadurch auftretende Ungenauigkeit des Feedbacks die möglichen Gewinne wieder zu verlieren.

Im Verlauf des Projektes wurde zunächst mit Hilfe von Link- und System-Level-Simulationen einer einzelnen Zelle gezeigt, dass mit dem Rate-Approximation-Verfahren Gewinne bei der spektralen Effizienz gegenüber den bisherigen Nutzerpaarungsalgorithmen insbesondere auch dann erreicht werden können, wenn die Feedback-Information nur relativ stark quantisiert vorliegt. Die Verwendung mehrerer Antennen bei der Teilnehmerstation führt zu einer weiteren Verbesserung der Gewinne.

Schließlich wurde das Rate-Approximation-Verfahren in der Multizellumgebung untersucht. Hier hat sich gezeigt, dass Rate Approximation beim Zusammenspiel von Codebook-basiertem Feedback der Kanalinformation mit begrenzter Feedback-Datenrate deutliche Vorteile gegenüber anderen Verfahren hat. Zwar könnten viele der bisherigen Verfahren bei hohen Feedback-Datenraten theoretisch bessere Gewinne als Rate Approximation erzielen. Sobald die Feedback-Datenrate jedoch reduziert wird, erweist sich Rate Approximation hinsichtlich der damit verbundenen Reduktion der Gewinne als wesentlich robuster und zeigt bei den für die Praxis interessanten kleinen Feedback-Raten höhere Gewinne als die anderen Verfahren. Ein Nachteil des Rate-Approximation-Verfahrens ist die relativ hohe Rechenkomplexität, die eine praktische Implementierung derzeit unmöglich macht. Deshalb wurde eine Variante mit reduzierter Komplexität entwickelt, die auf einem heuristischen Ansatz anstelle einer vollständigen Optimierung basiert. Auch für diese Variante konnten vergleichbare Gewinne in der Systemsimulation verifiziert werden.

In weiteren Detailuntersuchungen mittels Systemsimulation wurden die Einflüsse realer Link Adaption, verschiedener Codebooks sowie mehrerer Antennen auf der Empfängerseite untersucht und daraus entsprechende Designhinweise abgeleitet.

In Abbildung 9 ist die erreichbare spektrale Effizienz von Rate Approximation im Vergleich zu "Block Diagonalization" und Zero-Forcing" in Abhängigkeit von der Anzahl Feedback-Bits pro zugewiesener Nutzer-Ressource dargestellt. Während die spektrale Effizienz bei den anderen Verfahren stark von der Anzahl Feedback-Bits abhängt, ist Rate Approximation weitgehend davon unabhängig und erreicht insbesondere für kleine Feedback-Raten die höhere spektrale Effizienz.

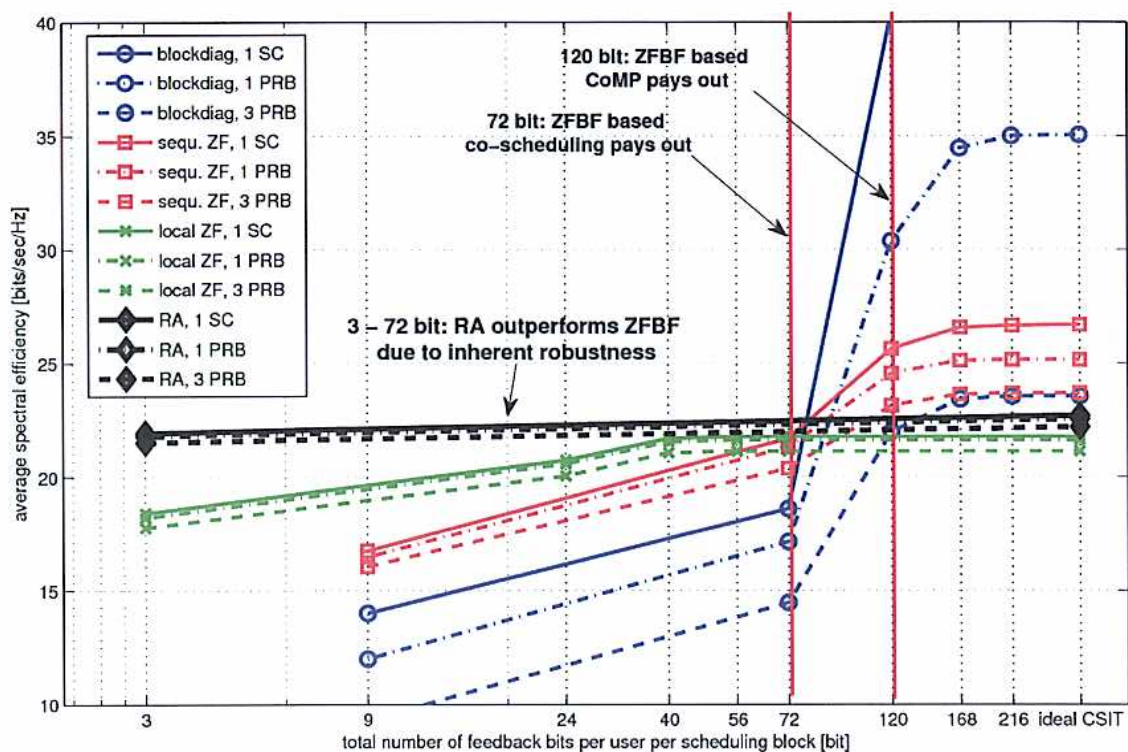


Abbildung 9: Erreichbare spektrale Effizienz von Rate Approximation im Vergleich zu "Block Diagonalization" und "Zero Forcing"-Ansätzen

Special Group X2

Die X2-Arbeitsgruppe hat die Anforderungen an sowie mögliche Technologien für einen CoMP unterstützenden Backhaul untersucht und ihre Ergebnisse in zwei EASY-C-internen Dokumenten [16, 17] zusammengefasst, die im Folgenden kurz zusammengefasst werden.

CoMP stellt harte Anforderungen an die Latenz der X2-Schnittstelle, die für CoMP nur bis zu wenige Millisekunden betragen darf. Im Downlink bestimmt die Kohärenzzeit des Kanals die maximal tolerierbare Latenz, vgl. beispielhaft Abbildung 10. Im Uplink ist im Wesentlichen der synchrone HARQ-Prozess maßgeblich, der eine Latenz unter 1 ms erfordert. Durch Tricks kann hier die tolerierbare Latenz auf 6 ms bis 9 ms vergrößert werden, allerdings hat dies Einschränkungen im Scheduling zu Folge, was zwar nicht die spektrale Effizienz jedoch u. U. die erzielbare Peakrate je UE verringert.

Der zusätzliche Bandbreitenbedarf für Beam Coordination kann vernachlässigt werden, wie auch der Kontrollverkehr von Downlink Joint Processing (DL JP). Beide betragen nur einige Mbit/s je Basisstation α 3 Zellen. Dagegen vervielfacht sich bei DL JP der Bandbreitenbedarf für Benutzerdaten (S1-Schnittstelle, typisch <100 Mbit/s) entsprechend der Anzahl kooperierender Basisstationen, bei z. B. 3 kooperierenden Basisstationen also um den Faktor 3.

Die größten Anforderungen hinsichtlich Bandbreite stellt jedoch Uplink Joint Processing (UL JP). Der Austausch von I/Q Samples (im Frequenzbereich nach FFT) benötigt einige Gbit/s je Basisstation. Der Bedarf kann um eine Größenordnung gesenkt werden, wenn von kohärentes auf nichtkohärentes UL JP umgestellt wird und Soft Bits statt I/Q-Samples

ausgetauscht werden, bei deutlich verringertem Gewinn (zumindest aus informations-theoretischer Sicht wäre eine vergleichbare Reduktion durch Kompression der I/Q-Samples denkbar, ein entsprechendes praktisches Verfahren ist aber nicht bekannt). Schließlich kann durch Umstieg auf einfache Macro Diversity, d.h. auf den Austausch vollständig dekodierter Daten, der zusätzliche Bedarf weiter reduziert werden auf unter den der S1-Schnittstelle bei noch kleinerem Gewinn.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass bezüglich Backhauling des X2-Interfaces die wenige Millisekunden maximale Latenz, die allen CoMP-Verfahren gemeinsam ist, die wichtigste Anforderung an ein zukünftiges Backhauling für CoMP darstellt, während sich hinsichtlich Bandbreitenbedarf einzig kohärentes Uplink Joint Processing mit einigen Gigabit pro Sekunde kritisch darstellt.

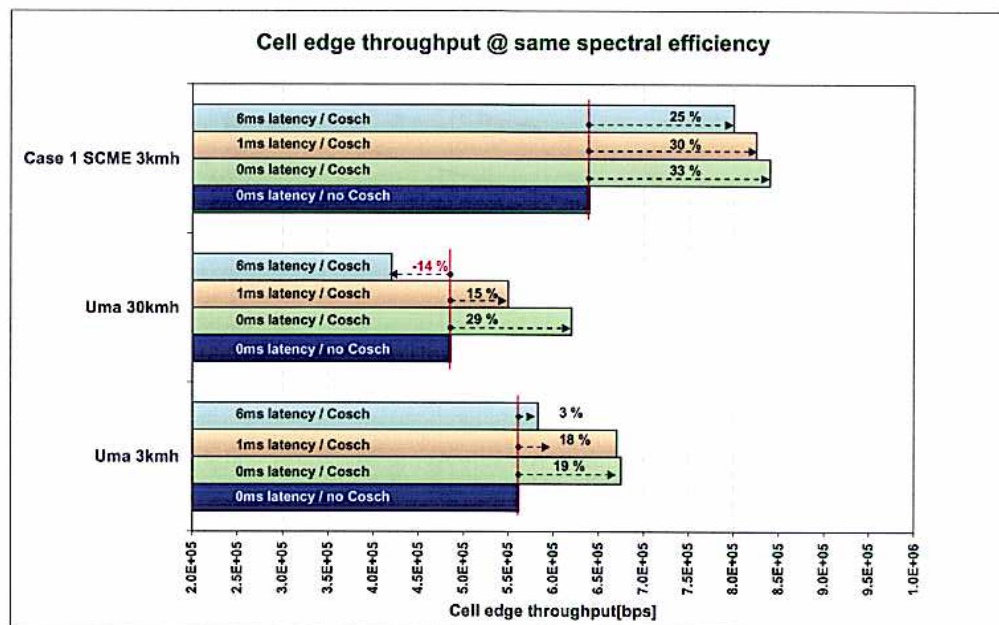


Abbildung 10: Auswirkung der X2-Latenz auf die Performance am Beispiel von Downlink Coordinated Beamforming (SU-MIMO, 4x2 V-pol. $\lambda/2$, 500 m ISD, 3GPP SCME Case 1 und ITU UMa, 3D-Antennenmodell, 3 km/h and 30 km/h UE-Geschwindigkeit); aus [16].

An Backhaul-Technologien wurden Ethernet, passive optische Netze (xPON), Mikrowellen und optischer Richtfunk (Free Space Optics, FSO) sowie Digital Subscriber Line (xDSL) untersucht. Abgesehen von FSO und xDSL erlauben alle diese Technologien hohe Bandbreiten wie auch geringe Latenzen und stellen erlauben somit den Einsatz der meisten CoMP-Verfahren. Jedoch stammt der größte Beitrag zur X2-Latenz nicht von der Link-Layer-Technologie, sondern von den Warteschlangenverzögerungen innerhalb der Netzknoten paketvermittelter Netze, insbesondere bei geringen Bandbreiten unter 1 Gbit/s. Aktuelle RANs, wie sie beispielsweise auf einer Breitbandaggregationsplattform aufsetzen, können so momentan keine X2-Latenzen von 1 ms garantieren, obwohl dies aus technischer Sicht durch entsprechende Auslegung der Netze zusammen mit einer strikten Priorisierung und Zugangskontrolle zur Begrenzung der Warteschlangenverzögerungen möglich erscheint, zumindest für Bandbreiten ab 1 Gbit/s.

Ergebnis der X2-Gruppe ist somit, dass zwar für CoMP hinreichend leistungsfähige Backhaultechnologien existieren, Radio Access Networks jedoch derzeit für CoMP unzureichend ausgelegt sind, sowohl hinsichtlich Bandbreite wie auch Latenz.

AG 2: Technologie-Testbett

AP 2.1: Testbett Spezifikation

Die Spezifikationen der Luftschnittstelle für die Phasen SoA1 [9] und SoA2 [10] des EASY-C Projekts wurden von ALU erstellt und mit den relevanten Projektpartnern Signalion, TU Dresden, HHI und NXP ausgetauscht.

Die ALU Basisstation für LTE Prototyp wurde sowohl mit integrierten Transceiver, als auch mit über optisches Interface angebundenen Remote Radio Head (RRH) implementiert.

Auch die Spezifikationen der Schnittstelle zur Anbindung der Remote Radio Heads (RRH) von Partner Kathrein an die ALU Basisstation wurden von ALU erstellt und mit Kathrein ausgetauscht [11].

Als Ausgangsbasis wurde der LTE Prototyp in Phase D2.4 [8] mit folgendem Featuregehalt benutzt:

- 5MHz und 10MHz System Bandbreite,
- 3GPP Rel8 Numerologie,
- 3GPP Rel8 Coding Chain,
- QPSK, 16QAM und 64QAM (DL) Modulation,
- 1Tx DL, 2Tx SFBC DL, 2Rx SIMO UL,
- HARQ, Link Adaptation, Frequency-Selective Scheduling,
- Random Access,
- Mobilität zwischen Zellen.

Unter der Einschränkung statischer Transport Formate wurden in Phase D2.4 auch einfache Formen von Spatial Multiplexing MIMO unterstützt (2x2 PARC in DL, 2x2 MU-MIMO UL).

AP 2.2: Testbett Implementierung

In Phase SoA1 [9] wurden Downlink open loop MIMO Features für zwei Sendeantennen (2x2 MIMO PARC/SFBC) mit Link Adaption und Rang Anpassung als Firmware Upgrades in der ALU Basisstation implementiert.

In Phase SoA2 [10] wurden als Firmware Upgrades in der ALU Basisstation implementiert:

- Downlink closed loop MIMO features für zwei und vier Sendeantennen (2Tx/4Tx precoding) mit Link Adaption und Rang Anpassung,
- Uplink 4Rx MMSE Empfänger mit Link Adaption für verteilte RRHs,
- Uplink 2Rx Serial Interference Cancellation Receiver (SIC) mit Link Adaption.

Die Transceiver der ALU Basisstation wurden von bestehender Hardware auf UMTS Band 7 umgerüstet. Die analogen Komponenten für Sende- und Empfangszweig wurden

umgerüstet, dedizierte Leistungsverstärker wurden angefertigt und im Digitalteil wurden Sende- und Empfangspfade angepasst. Neue Transceiver Module wurden aufgebaut. Dazu wurden neue Leiterplatten entworfen, gefertigt und bestückt.

Monitoring Tool

Für die Alcatel Lucent Labor- und Feldtest für EASY C wurde ein Monitoring-Tool entwickelt. Mit diesem Tool werden wichtige Kenngrößen (Durchsatz, BLER, SIR) von der eNodeB und dem Testmobile gleichzeitig aufgezeichnet. Zur Synchronisierung der beiden aufgezeichneten Traces werden GPS-Informationen verwendet. Für die Labormessungen erlaubt das Tool zusätzlich die Ansteuerung und Konfigurierung der Fadingemulatoren.

Das Monitoring Tool kann in analoger Weise für Feldtest eingesetzt werden. Hierbei werden von dem Tool mehrere Testmobile gleichzeitig unterstützt. Die Rohmessdaten werden jeweils im Binärformat abgespeichert und später offline ausgewertet.

Integration des Testbetts

AP2.3 Testbett Labortest Test Setups, die einerseits den Anforderung von Feldtestbedingungen gerecht werden, andererseits auch genügend Analysemöglichkeiten für die Fehlersuche sowie die Auswertung der Messdaten und Algorithmenoptimierung berücksichtigen, wurden konzipiert. Es wurden Test Setup für die Frequenzbänder 1 und 7 (2.1 GHz bzw. 2.6 GHz) aufgebaut und getestet.

Die Hauptelemente der Set ups sind jeweils eine eNodeB ein Testmobile und ein Fadingemulator für Kanalmessungen ; siehe Abbildung 11.

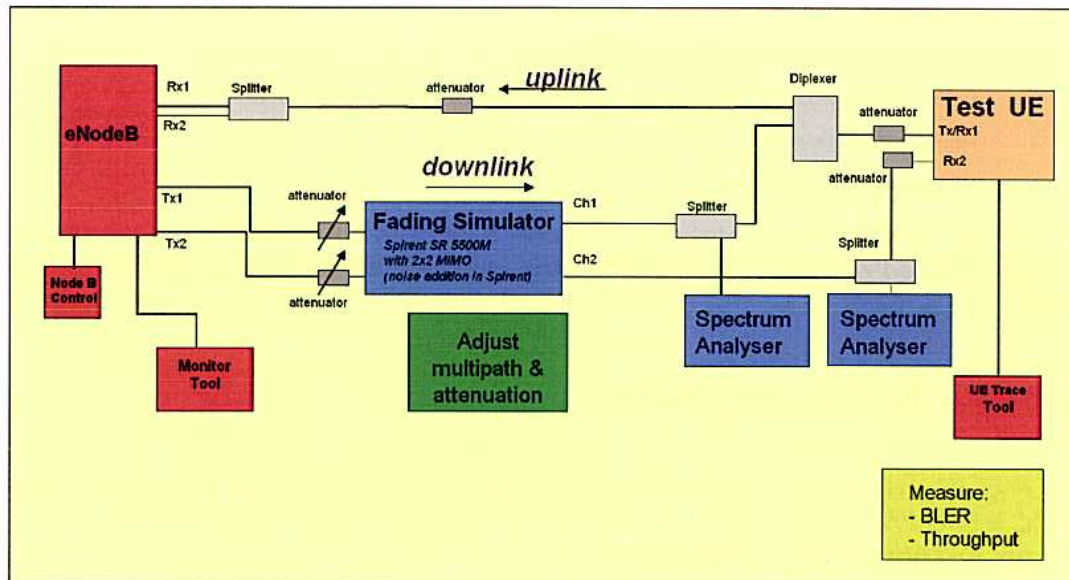


Abbildung 11: Aufbau für Labormessungen im Downlink

Automatisierte Performance-Messungen mit obigem Set up konnten mit dem Monitoring Tool durchgeführt werden. Hierbei werden die Daten von der eNodeB und dem Testmobile gleichzeitig aufgezeichnet. Für die Messung der Uplink Performance stand ein entsprechender Aufbau zur Verfügung.

Messungen LTE Baseline Resultate für LSTI

Messungen mit dem LTE Prototyp System zur Evaluierung der LTE Baseline-Performance wurden durchgeführt, um die Proof of Concept (PoC) Phase von LSTI zu bedienen. LSTI [18] ist ein Konsortium aus Netzbetreibern und Herstellern von Netzwerk- und Test-Equipment mit dem Ziel, das LTE Ökosystem voranzutreiben.

Folgende LSTI PoC Arbeitspakete wurden bedient:

- Durchsatz mit festen Transportformaten / Spitzendurchsatz,
- Durchsatz mit Link Adaptation,
- Durchsatz für schnell bewegte Teilnehmer,
- Multiuser Scheduling Downlink,
- QoS / garantierte Durchsätze,
- Protocol Overhead,
- Latenz auf User Plane,
- Latenz für Handover,
- Uplink Power Control.

Die Messergebnisse zu diesen Arbeitspaketen sind in die konsolidierten, von LSTI veröffentlichten Ergebnisse [19, 20] eingeflossen, wie in Abbildung 12 dargestellt. Weiter wurden einige dieser Messergebnisse gemeinsam mit Projektpartnern veröffentlicht [21].

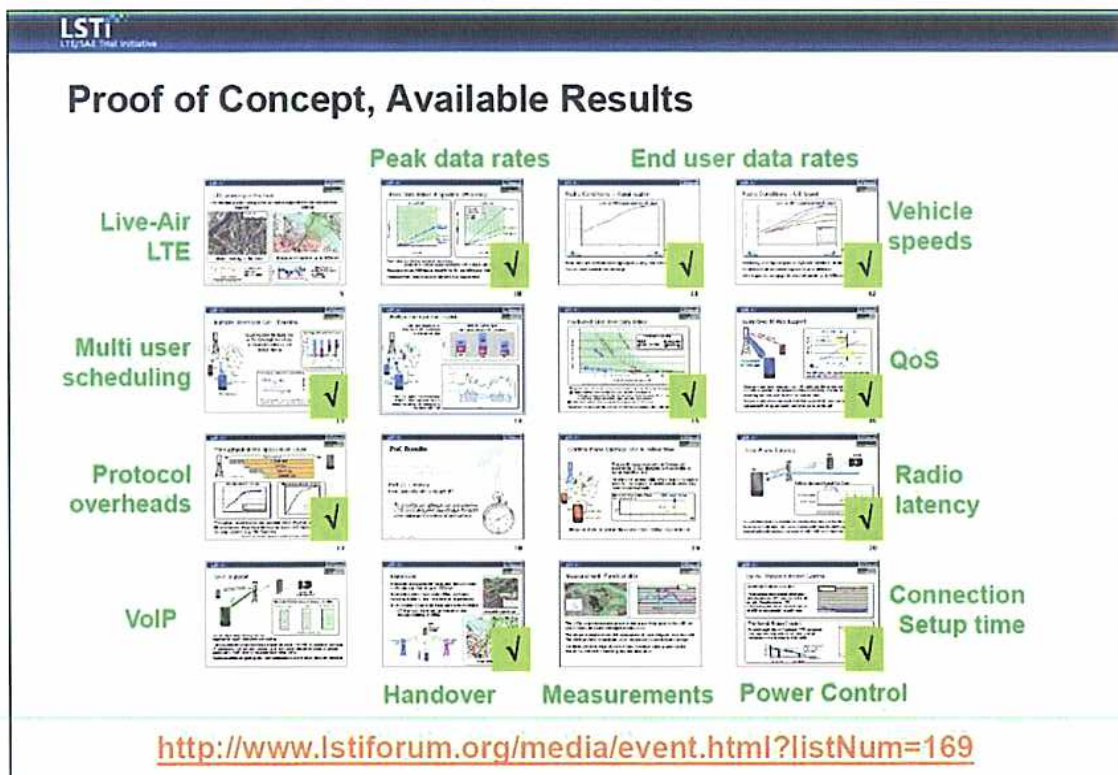


Abbildung 12: Ergebnisse der LSTI PoC Phase und ALU Beiträge (✓).

Labortests MU-MIMO mit SIC Receiver

Zur Vorbereitung der Uplink Feldversuche wurden die implementierten Multiuser-MIMO (MU-MIMO) Schemata und SIC Receiver Algorithmen (Successive Interference Cancellation) im Labor getestet. Der Vorteil dieser quantitativen Laborversuche ist die genaue Kontrolle und Reproduzierbarkeit. Die Validierung der Implementierung und die Kommunikation mit Signation-Testmobiles erfolgten mit einem Labor-Set up für verschiedene Fadingkanäle für „vehicular“ und „pedestrian“ Nutzer wurden mit Fadingemulatoren und 2 Testmobiles von Signation Messungen durchgeführt.

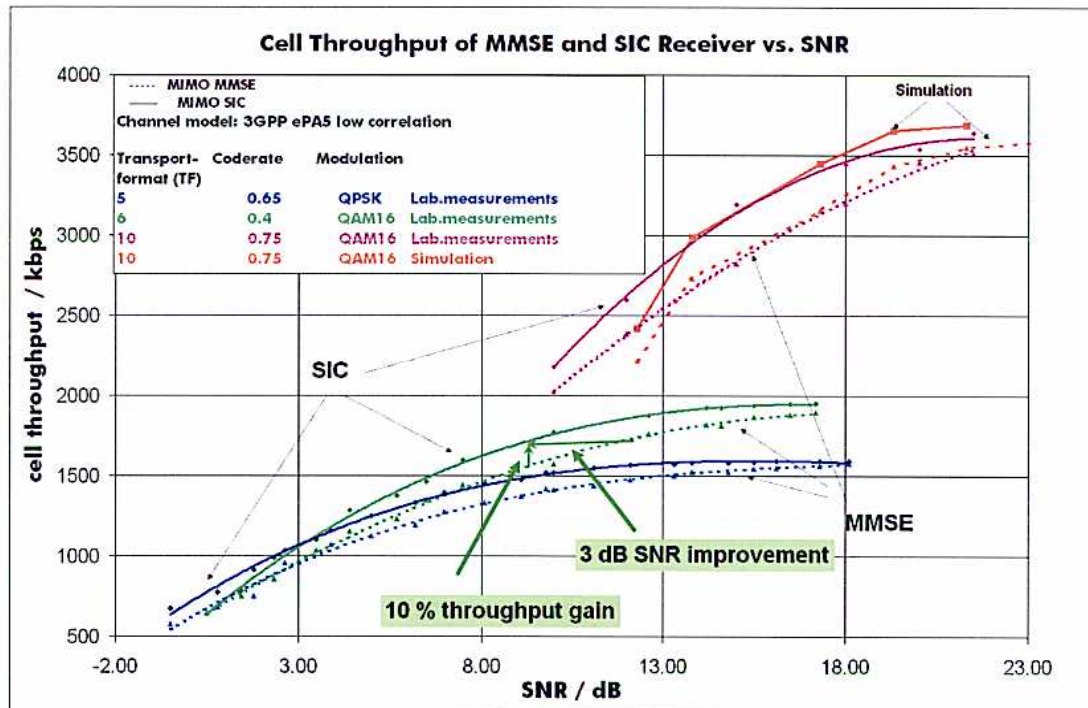


Abbildung 13: Ergebnisse von Labormessungen mit UL MU_MIMO und SIC Receiver

Die Ergebnisse der Labormessungen (siehe Abbildung 13) mit UL MU-MIMO zeigten bei Nutzung der SIC Receiveralgorithmen einen Durchsatzverbesserung von 10% für verschiedene Transportformate. Anders betrachtet kann mit diesem Algorithmus das SNR um 3 dB verbessert werden.

AP2.4: Feldtest

Versuchsplanung

Bei den Labortest mit den jeweiligen neuen Verfahren wie z. B. MU-MIMO mit SIC Receivern oder Makro Diversity wurde das grundlegende Verhalten der neuen Algorithmen getestet und das mögliche Potential aufgezeigt. Anhand dieser Ergebnisse wurde eine Versuchsplanung für Feldtest erstellt, wobei in einem ersten Schritt das jeweils geeignete Feldtestbett in Dresden bzw. Berlin ausgewählt wurde. Für die Makro-Diversity Messungen mit RRH, die über Glasfaser mit der Funkstation verbunden waren, war z. B. das Testbett in Berlin das geeignete, da dort eine Punkt- zu Punktverbindung von verschiedenen Sites mit Glasfaser möglich war. Das Testbett in Dresden war besonders geeignet für Versuche mit Nachbarzell-Interferenz.

Anschließend wurde eine detaillierte Konfiguration des für die jeweiligen Tests notwendigen Aufbaus definiert. Dies umfasste die Auswahl der verwendeten Funkstationen, Ausrichtung von Antennen, Festlegung von optimalen Fahrtrouten,

Bestimmung der jeweils notwendigen Anzahl von Testmobiles und die Auswahl der geeigneten Störer. Mit diesen Konfigurationen wurden in dem jeweiligen Testbed

Grundtests der neuen Algorithmen durchgeführt, um die Funktion des Features nachzuweisen und den geplanten Versuchsaufbau gegebenenfalls zu optimieren.

Anschließend wurden Feldtests mit eindeutig unterscheidbaren Testszenarien mit den jeweiligen Algorithmen durchgeführt, die die Vorteile und Begrenzungen der Feature herausarbeiteten.

Aufbau Feldtestbett in Dresden

Grundmessungen im Testbed Dresden

Im Mai 2009 wurden Feldtest im Dresdener Testbed mit einer ALU Basisstation und Signa-
lion Testmobiles durchgeführt. Die „Serving Cell“ war der Standort Hauptbahnhof (Sektor Süd). Für Tests mit Interferenzen konnten die Standorte HBF Süd 60° bzw. 180° und Lenneplatz 180° bzw. 300° verwendet werden. Für Meßfahrten im Gebiet südlich vom HBF mit einem Zellradius von ca. 1200 m stand ein Messbus zur Verfügung. Die Messungen wurden im Band 7 (2.6 GHz) mit 10 MHz Bandbreite durchgeführt. Die Sendeleistung der ALU Basisstation betrug hierbei 37 dBm. Es wurden Test mit Downlink SIMO (siehe Abbildung 14), Uplink SIMO, Downlink SU MIMO, Uplink MU MIMO und zu Downlink SIMO mit Störern durchgeführt. Testfahrten zur Bestimmung der Empfangspegels zeigten ein RSSI von -50 dBm in Nähe der Basisstation und von ca. -90 dBm am Zellrand. Bei Downlink SIMO Konfiguration der eNodeB wurde eine Datenrate von 15-30 MBit/s für signifikante Teile der Fahrtroute gemessen.

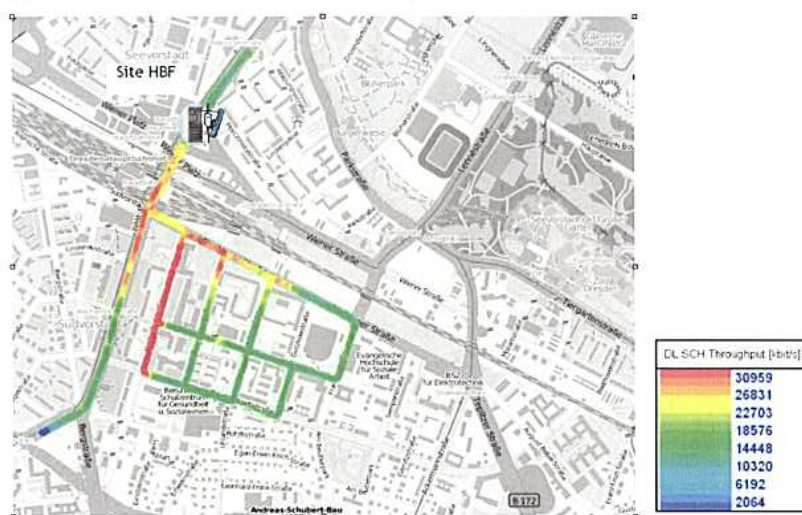


Abbildung 14: gemessener Downlink Durchsatz SIMO

Bei Uplink SIMO wurde eine Datenrate von bis zu 17.2 MBit/s für Gebiete mit guter Kanalqualität gemessen. Bei Messfahrten mit Downlink SU MIMO wurden mittlere Peakdatenraten von 50.8 MBit/s für Zonen mit guter Kanalqualität gemessen. Tests mit Downlink SIMO Konfiguration mit 3 Störern, deren Leistung bei verschiedenen Messfahrten variiert wurden, zeigten eine starke Abhängigkeit des mittleren Durchsatzes von der Interferenzleistung (ca. 28-38 dBm jeweils an den Basisstation gemessen). Erste Tests mit

Multiuser MIMO wurde mit festen Transportformaten mit einem statischem Testmobile und einem bewegten Testmobile (Rickshaw), das sich auf das statische zu bewegte, durchgeführt.

Test mit Multi-user MIMO und SIC Receiver

Nach den erfolgreichen Labortest wurden Anfang 2010 Feldversuche mit Multi-User MIMO und dem SIC Empfänger in einem realen städtischen Testfeld-Szenario durchgeführt, um weitere Vorteile der innovativen Empfängeralgorithmien herauszuarbeiten.

Die Basisstation am Standort "Hauptbahnhof" wurde mit X-Pol Antennen für einen Sektor ausgerüstet, die eine Zelle mit dichter urbaner Bebauung abdeckten. Die Trägerfrequenz lag bei 2,6 GHz mit einer Bandbreite von 10 MHz. Für die Versuche wurden zwei Test-Terminals von Signalion verwendet, ein stationäres in einer Entfernung von etwa 500 m von der Basisstation auf einem Parkplatz eines Einkaufcenters mit regem Verkehr und ein zweites Test-Terminal wurde in einem Meßbus installiert (siehe Abbildung 15).

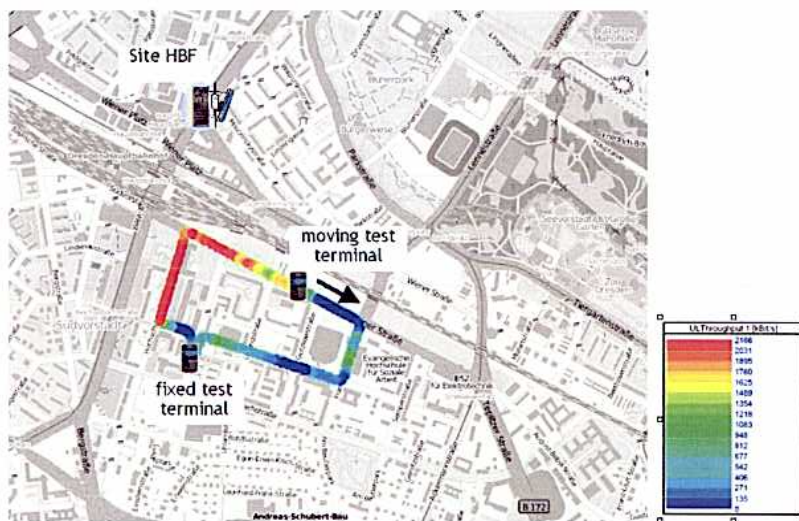


Abbildung 15: gemessener Uplink Durchsatz im Testfeld-Szenario

Das Uplink SINR des statischen Mobiles variierte aufgrund der auftretenden Kanal-Änderungen zwischen (8-15) dB. Die Fahrtroute wurde so gewählt, dass das Uplink SINR des bewegten Mobiles zwischen (0-30) dB variierte. Mit diesem Versuchs-Szenario ist das Uplink SINR des beweglichen Mobiles für einen Teil der Fahrstrecke besser als das des statischen Mobiles und für andere Bereiche der Strecke niedriger. Die Schwellen der Link-Anpassungsparameter wurden für verschiedene Multiuser-MIMO-Testfahrten mit und ohne SIC-Receiver Algorithmus in 2 dB Schritten variiert.

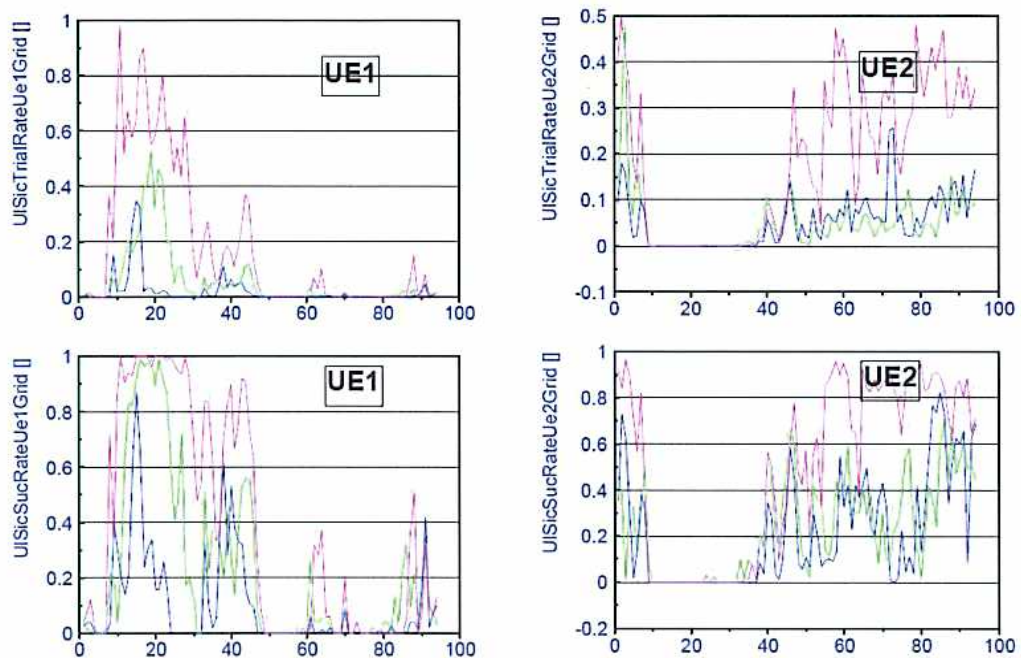


Abbildung 16: Ergebnisse der UL SIC Nutzungs- und Erfolgsrate für das statische und das bewegte UE

Im oberen Teil der Abbildung 16 ist der Anteil der SIC Nutzung für das statische und für das bewegte Test-Terminal angezeigt. In Abhängigkeit von den gewählten Link-Anpassungsparameter ergibt sich eine starke Zunahme der Nutzung des SIC-Receiver Algorithmus um 60 % für das statische Mobile und von 40% für das bewegliche Mobile. Im unteren Teil der Abbildung 16 sieht man eine SIC-Empfänger Erfolgsrate von bis zu 80 % für beide Mobiles, das statische und das bewegte.

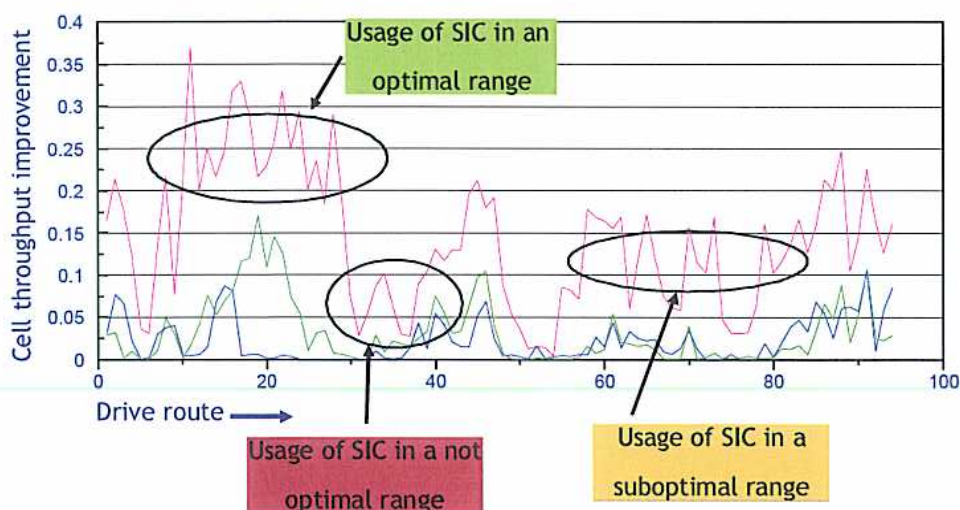


Abbildung 17: Verbesserung des Zelldurchsatzes bei Nutzung des SIC Empfängers

In der obigen Abbildung 17 sieht man eine Verbesserung des Zelldurchsatzes bei Nutzung des SIC-Empfängers von ca. 25% für günstige Feldbedingungen. Offensichtlich gibt es keinen Nachteil bei Nutzung des SIC Receiver Algorithmus, da dieser nur dann angewandt wird, wenn die konventionelle Dekodierung nicht erfolgreich war. Zusätzlich ist es wirklich wichtig herauszustellen, dass keine Änderungen oder Anpassungen der Mobile Algorithmen notwendig sind.

Aufbau Feldtestbett in Berlin

Im Juli bis November 2009 wurden drei Feldtests zur Charakterisierung von UL COMP im Berliner Testbed durchgeführt. Die Konfiguration bestand aus einer ALU Basisstation und 2 Remote Radio Heads (RRH) von Kathrein. Die Basisstation wurde in der Kuppel des Heinrich-Hertz-Instituts (HHI) installiert und jeweils ein RRH von Kathrein auf dem Dach der TU Berlin und dem Dach des T-Labs Gebäudes. Der Datenaustausch zwischen der Basisstation und den RRH erfolgte über jeweils ca. 3 km lange Glasfaserstrecken mit einer Datenrate von 2.5 GBit/s über CPRI-Interfaces. Der Abstand der RRHs zueinander und die Distanz zum HHI beträgt jeweils ca. 600 m Luftlinie.

Im Juli wurden Feldtests mit 2 Empfängern im Band 7 (2.6 GHz) mit 10 MHz Bandbreite durchgeführt. Testfahrten wurden mit 2 Rx-Konfiguration (1 RRH) und mit Macro-Diversity Konfiguration (2 RRH mit jeweils 1 Rx) durchgeführt. Für diese Testfahrten standen Messbusse des HHI und von T-Labs zur Verfügung. Bereits diese ersten Feldtests zeigten eine deutliche Verbesserung des Uplink-Durchsatzes bei der Macro-Diversity Konfiguration (siehe Abbildung 18), besonders am Zellrand der Fahrtroute.

Im Oktober und November 2009 wurden Feldtests für die Aufwärtsrichtung mit 4 Empfängern in 2 RRH durchgeführt unter Verwendung von jeweils zwei kreuzpolarisierten Antennen. Die Trägerfrequenz war auch bei diesen Tests 2.6 GHz (Band 7) und die Bandbreite 5 MHz. Es wurden Testfahrten mit 2 Rx-Konfiguration (1 RRH) und mit 4 Rx-Konfiguration (bei 2 aktiven RRHs) durchgeführt. Ein Vergleich der gemessenen Durchsätze zeigte einen signifikanten Macro-Diversity-Gewinn bei den 4 Rx Messungen im Vergleich zu den 2 Rx Messungen. Im 2RX-Fall wurde ein klassisches Szenario zugrundegelegt, das einen Handover für Terminals am Zellrand (mit Handover Threshold 0 dB). berücksichtigt Aufgrund der hohen gemessenen SINR-Werte beim Macro-Diversity-Betrieb ist Potential für eine weitere Verbesserung der Durchsätze sichtbar, wenn zusätzlich 64 QAM Modulation in Uplink eingesetzt würde.

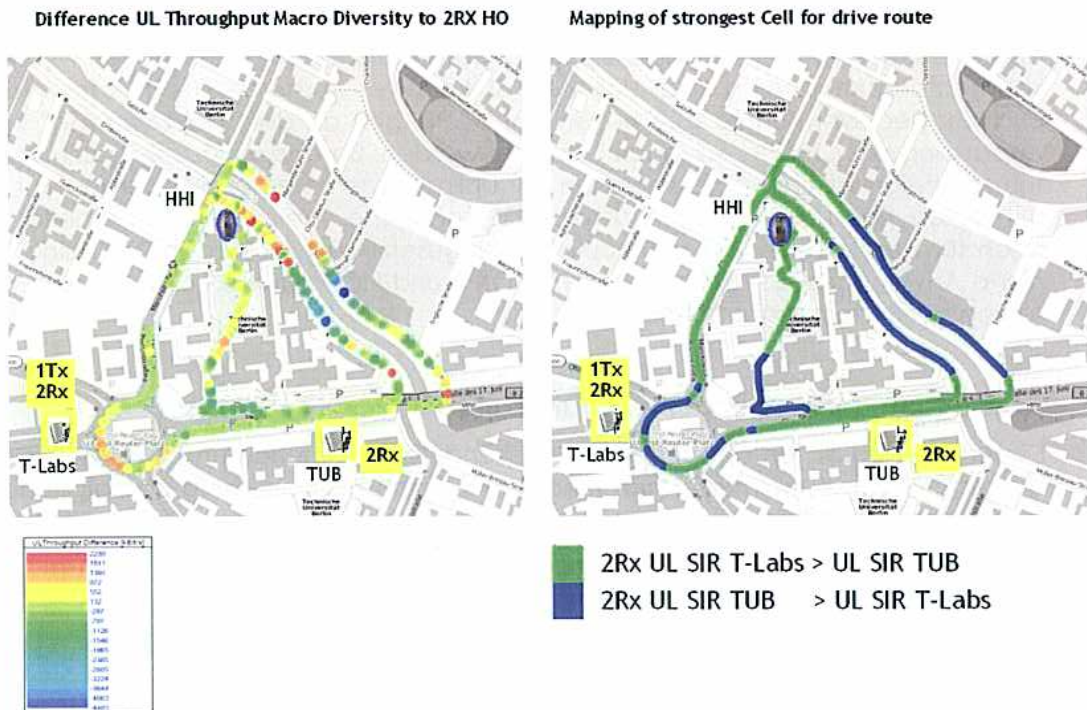


Abbildung 18: Verbesserung der Durchsätze sowie der Zellabdeckung für die Makro-Diversity-Feldtest im Berliner Testbett

In einem weiteren Feldtest im Juli 2010 wurde die Coverage Verbesserung mit Macro-Diversity untersucht. Hierzu wurden Testfahrten mit 2RX Empfang und mit Macro-Diversity am Zellrand durchgeführt und miteinander verglichen. Der erreichbare Zellradius vergrößerte sich von 1200 m für den 2 Rx Fall auf ca. 1800 m für die Macro-Diversity Konfiguration. Dies zeigt deutlich das Potential für eine signifikante Verbesserung der Zellabdeckung abhängig von den Umgebungsbedingungen. In einem weiteren Test wurde exemplarisch das Systemverhalten mit einem Uplink-Interferer (weiteres Testmobile) untersucht. Der Störer wurde hierzu in einem Abstand von ca. 750 m zur Basisstation HHI positioniert. In dem gewählten Szenario konnten die Datenraten mit Macro-Diversity in Zellmitte um bis zu einen Faktor 3 gegenüber den Datenraten mit 2Rx erhöht werden. Zudem konnte auch hier eine deutliche Verbesserung der Zellabdeckung von ca. 50 % gezeigt werden.

Zusammenfassung

Bei den Feldtests mit den jeweils untersuchten neuen Algorithmen konnten Ergebnisse und neue Erkenntnisse erzielt werden, die die bei Simulationen und Labortests vorausgesagten Eigenschaften prinzipiell bestätigten. Darüber hinaus war es nur mit den Feldtest möglich, die Vorteile und Begrenzungen der untersuchten Verfahren beim tatsächlichen Betrieb herauszuarbeiten.

Die Benutzung von Multi-User MIMO und SIC Receiveralgorithmen mit einer optimalen Linkanpassung der eNodeB führte zu einer signifikanten Zelldurchsatzverbesserung im Uplink. Im Dresdener Testbett beobachteten wir eine Steigerung der Zelldatenrate um 25% für guter Kanalbedingungen. Die berichteten Trials mit dem Berliner Testbett haben zudem gezeigt, dass Uplink CoMP in einer realistischen LTE Funkfeld gut machbar ist. Hierzu wurde eine zentrale eNodeB mit verteilten RRH mit einem Abstand von mehr als 500 m eingesetzt. Zudem zeigte sich, dass die Übertragung der Basisbanddaten über optische Glasfasern über eine Strecke von ca. 3 km verlustfrei funktionierte. Besonders

wichtig war hierbei eine optimale Systemabstimmung, so dass keine Nachteile mit den optischen Übertragungsverzögerungen auftraten bzw. diese ausgeglichen wurden. Die kohärente Überlagerung eines Uplink MMSE Receiver wurde bei den Feldtests validiert, und der Receiver konnte den hohen Anforderungen an das „delay spread“ und die Anpassung des „Timing Advance“ gerecht werden. Besonders für Zellrandnutzer konnten somit signifikante Verbesserungen der Uplink- datenrate gezeigt werden. Für Nutzer mit guten Kanalbedingungen sehen wir zusätzliches Verbesserungspotential, wenn auch für den Uplink 64-QAM Modulation eingesetzt wird. Außerdem lässt eine kombinierte Anwendung der beschriebenen COMP und SIC Verfahren eine weitere Verbesserung der Systemperformance erwarten.

Auswertung der Messungen des Funkkanals

Die erhaltenen Daten aus projektübergreifend von TU Ilmenau und MEDAV in Dresden durchgeführten Kanalmessungen (Phase 1) wurden zur Bewertung der folgenden Fragestellungen benutzt:

- Gewinn durch Single Stream Precoding für verschiedene Blockgrößen mit realistischer Verzögerung
- Gewinn durch frequenzselektives Scheduling für verschiedene Blockgrößen mit realistischer Verzögerung

Um die große Datenmenge noch handhaben zu können, wurde der Kanal auf 2x2 Kanäle für jede Zelle reduziert. Außerdem wurden nur Mess-Strecken in der zentralen Zelle mit einem signifikanten Anteil der Interferenz aus den benachbarten Zellen berücksichtigt. Für verschiedene Blockgrößen wurde aus diesen Mess-Strecken pro Zeitintervall ein optimaler precoding Vector unter der Berücksichtigung des resultierenden SNR errechnet. Zusätzlich wurde eine variable, durch Implementierung hervorgerufene Verzögerung berücksichtigt.

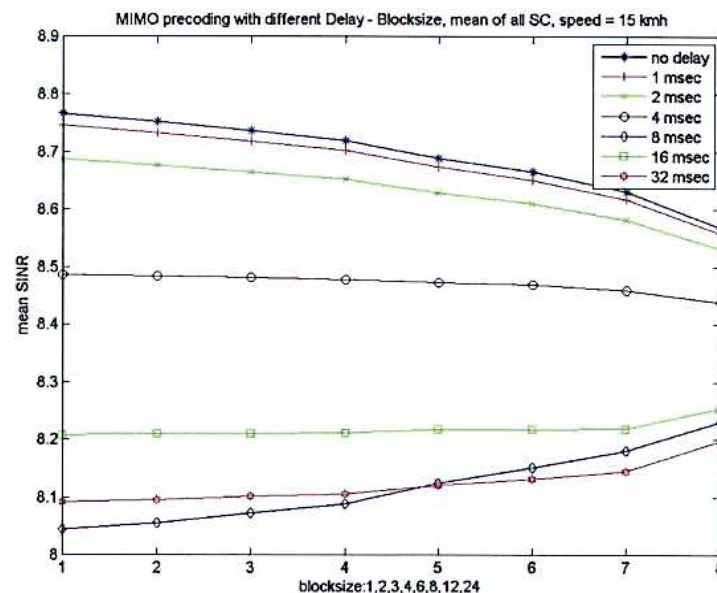


Abbildung 19: SINR-Verbesserung für MIMO precoding in Abhängigkeit von der spektralen Auflösung (Blocksize); Kurven für verschiedene Reporting Delays

In Abbildung 19 wird die Leistungsfähigkeit von MIMO Precoding mit verschiedenen Implementierungs-Verzögerungen in Abhängigkeit von der Frequenzauflösung (Block-

größen-Vielfachen von 78,125 kHz) gezeigt. Für kleine Verzögerungen für das Channel Reporting erreichen kleine Blockgrößen bessere SINR-Werte. Für große Verzögerungen kehrt sich dieses Verhalten um. Auch werden in diesem Fall kleinere Gewinne erzielt.

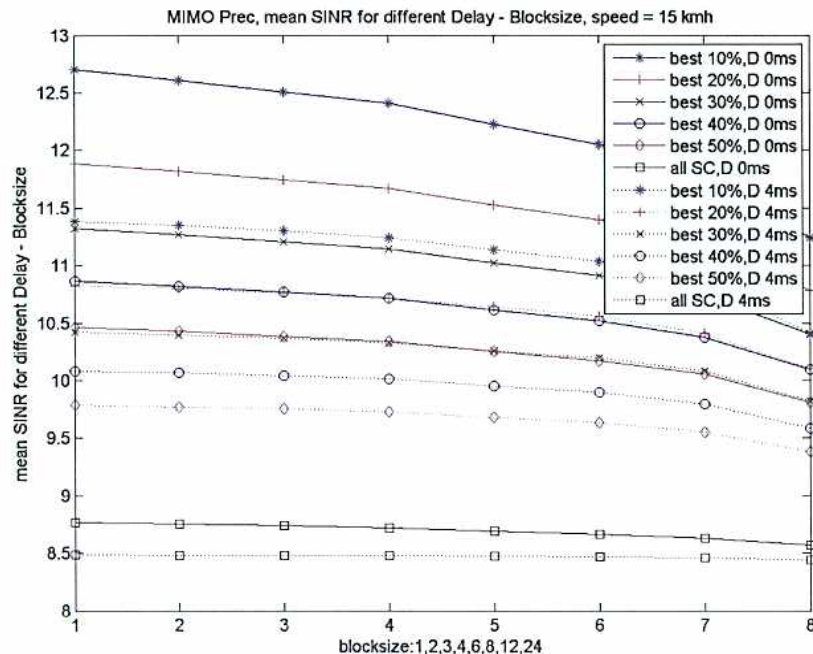


Abbildung 20: SINR Verbesserung von MIMO precoding in Abhängigkeit von der spektralen Auflösung; für frequenzselektives Scheduling. Kurven für verschiedene Nutzung des Frequenzbandes

Abbildung 20 zeigt einen deutlichen Gewinn von bis zu 4 dB für frequenzselektives Scheduling, wenn keine Verzögerung für das Reporting angenommen wird und bei langsamen Geschwindigkeiten. Für realistische Verzögerungen von 4 ms reduziert sich der maximale Gewinn auf 2,7 dB, unter der Annahme dass die günstigsten 10% des Frequenzbandes genutzt werden.

Funkkanal für kleine Zellen

In Zusammenarbeit mit HHI Berlin wurden zwei Kampagnen zur Messung der Downlink Übertragungskanäle für Relay-Knoten durchgeführt, eine erste Kampagne zur Messung der Backhaul Links von eNB zum Relay-Knoten [22] und eine zweite Kampagne zur Messung der Access Links vom Relay-Knoten zum Endgerät [23]. Die Veröffentlichung der Ergebnisse ist geplant.

Testumgebung

Beide Messkampagnen wurden auf dem Campus der TU Berlin durchgeführt und ein Relay-Knoten wurde an mehreren Positionen in das makrozellulare EASY-C Testbett eingebracht, um ein realistisches Inter-Zell Interferenz-Szenario zu emulieren. Der Campus ähnelt einer dichten urbanen Umgebung mit enger Bebauung und heterogenen Gebäudehöhen und Baumaterialien.

Kanalimpulsantworten wurden basierend auf orthogonalen Pilotsignalen gemessen, die synchron von bis zu sechs Zellen mit je zwei Sendeantennen gesendet wurden. Als Emp-

fänger wurde ein Test-UE mit zwei Empfangsantennen eingesetzt, d.h. es wurden simultan sechs 2x2 Kanalimpulsantwort-Matrizen gemessen. Die Matrizen wurden abgespeichert und offline ausgewertet.

Abbildung 21 illustriert das makrozellulare Testbett, in welches der Relay-Knoten eingebracht wurde. Bis zu sechs 120° Makro-Sektoren an drei Standorten mit Inter-Site Distanzen (ISD) von ca. 500m wurden beleuchtet. Die Antennen der Makro-Sektoren befanden sich auf Gebäuden mit Höhen von 49m bis 84m. Die Gebäudehöhen sind damit höher als in realen Deployments üblich. Die Sendeleistung pro Makro-Sektor betrug $2 \times 36.5\text{dBm}$ bei 20MHz System-Bandbreite. Der Downtilt wurde so gewählt, dass die Hauptkeulen bei ca. $0.33 \times \text{ISD}$ den Boden trafen. Die Downtilts sind damit etwas flacher als unter der 3GPP Annahme, die einem Auftreffen der Hauptkeule bei ca. $\text{ISD}/4$ entspricht.

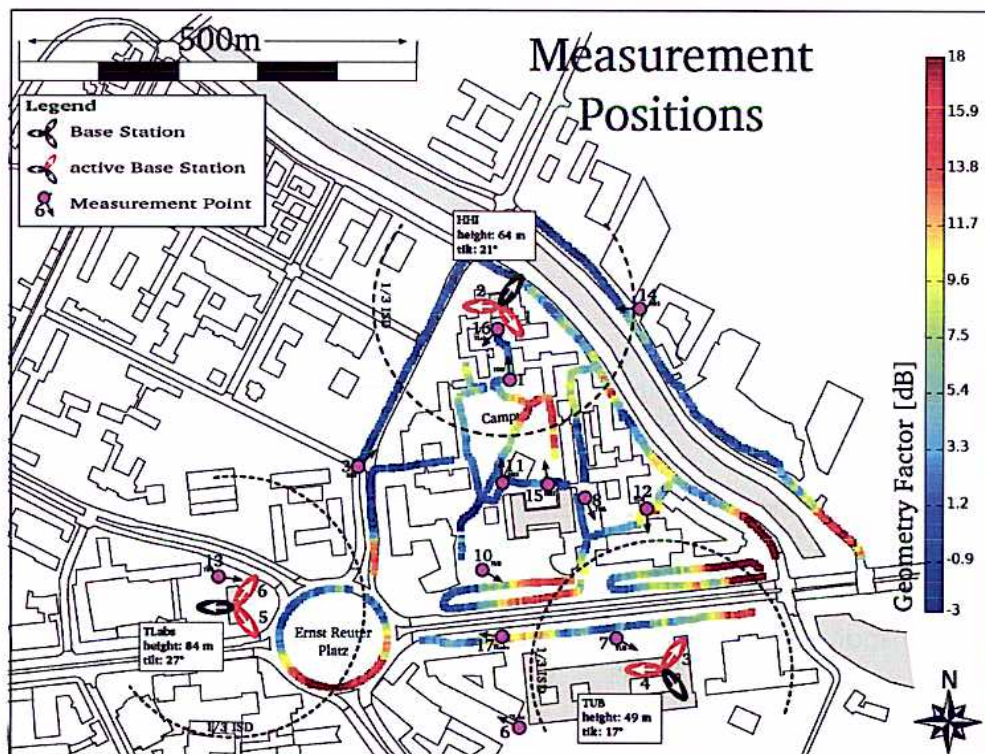


Abbildung 21: : Makrozelluläres Testbett für Relay Messungen und Relay-Standorte für Messungen der Backhaul-Links

Backhaul-Link

Messungen des Relay Backhaul-Downlink wurden an 13 Outdoor-Standorten durchgeführt, wie in Abbildung 21 illustriert. Dazu wurde ein Test-UE auf einer Hebebühne montiert, wie in Abbildung 22 dargestellt. An jedem Relay-Standort wurde basierend auf dem stärksten Empfangssignal die Geber-Zelle ausgewählt. Die Höhe der Empfangsantennen wurde während der Messungen von ca. 2m bis ca. 21m variiert. Drei Typen von kreuzpolarisierten Empfangsantennen mit Antennengewinnen von 4dBi bis 18dBi wurden wie in Abbildung 23 gezeigt eingesetzt.



Abbildung 22.: Hebebühne für Relay Messungen.

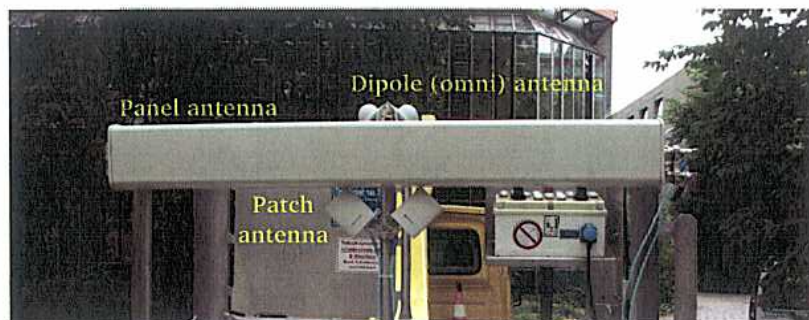


Abbildung 23: : Empfangsantennen für Messungen des Backhaul-Downlinks.

Abbildung 24 zeigt beispielhaft die aus den gemessenen Impulsantworten abgeleiteten Geometrie-Faktoren, d.h. das mittlere SINR am Backhaul-Empfänger des Relay-Knotens, als Funktion der Relay-Höhe für die drei Typen von Empfangsantennen. Man sieht, dass die Geometrie bei ca. 7.5dB beschränkt bleibt, was auf die außerordentliche Höhe der Antennen der Makro-Zellen zurückzuführen ist. Durch Koordination zwischen Zellen, kann die Geometrie des Backhaul-Links deutlich verbessert werden und in diesem Fall können Werte größer 15dB erreicht werden.

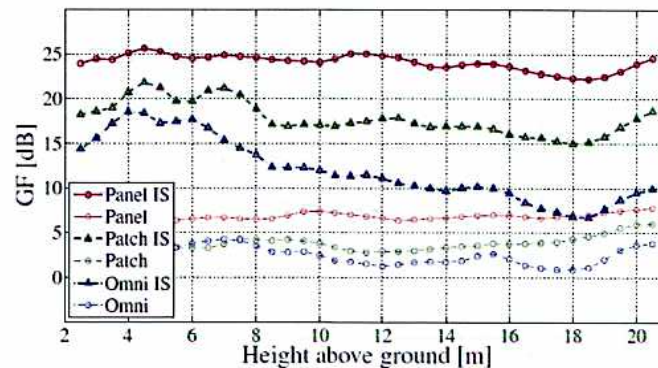


Abbildung 24: Geometrie des Backhaul-Links als Funktion der Relay-Höhe, gemittelt über alle gemessenen Positionen, für verschiedene Antennentypen, mit (IS) und ohne Koordinierung zwischen Makro-Sektoren.

Access-Link

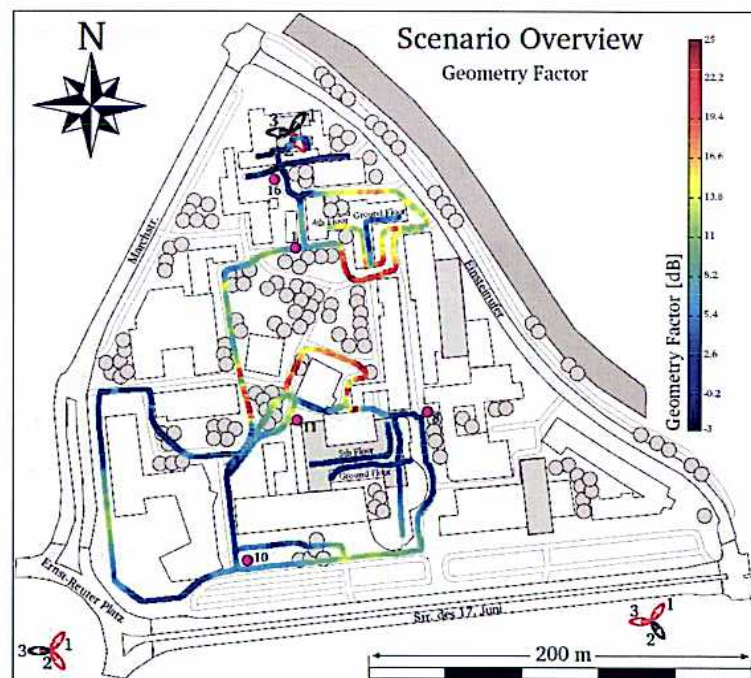


Abbildung 25: Makrozelluläres Testbed für Relay Messungen und Relay Standorte für Messungen der Access-Links.

Messungen des Relay Access Downlink wurden an fünf Outdoor Relay Standorten durchgeführt, wie in Abbildung 25 illustriert. Dazu wurde eine eNB auf einer Hebebühne montiert und die Sendeleistung auf ca. $2 \times 26.5 \text{ dBm}$ reduziert, wobei als Sendantennen verschiedene kreuz- und vertikal polarisierte Antennentypen und Konfigurationen zum Einsatz kamen. Die Höhe der Sendantennen betrug 5m und 9.3m. Im makrozellulären Testbett wurden fünf 120° Makro-Sektoren an drei Standorten beleuchtet.

Empfängerseitig wurde ein Test-Ue auf einen Handkarren montiert und mit einer kreuzpolarisierten Dipolantenne versehen, wie in Abbildung 26 gezeigt. Messungen wurden mit Schrittgeschwindigkeit auf Outdoor- und Indoor-Trajektorien in der Umgebung des Relay-Knotens durchgeführt.



Abbildung 26: Handkarren mit Test-UE zur Messung des Relay Access-Links.

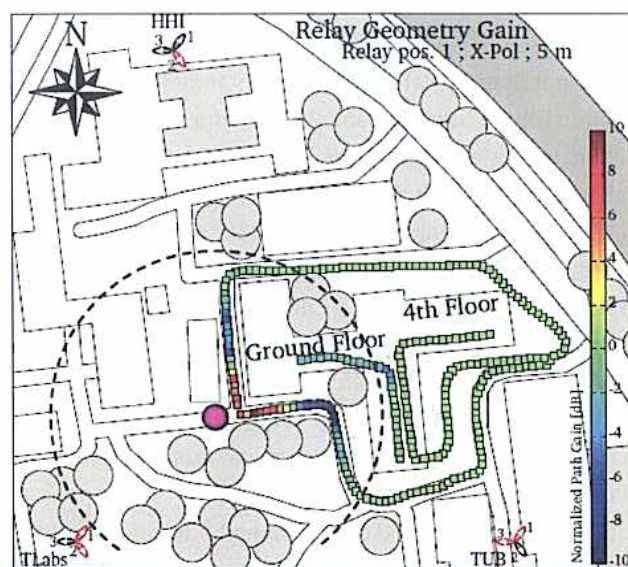


Abbildung 27: Änderung der Geometrie des Access-Links durch Einbringen des Relay-Knotens ins makrozellulare Testbed.

Abbildung 27 zeigt beispielhaft die aus den gemessenen Impulsantworten abgeleitete Änderung des Geometrie-Faktors des Access-Links am UE Empfänger durch Einbringen des Relay-Knotens ins makrozellulare Testbett, auf verschiedenen Etagen innerhalb und

außerhalb eines Gebäudes. Man sieht, dass der Geometrie-Faktor nahe beim Relay-Knoten deutlich verbessert wird, während in größerem Abstand zum Relay-Knoten bzw. innerhalb des Gebäudes der Geometrie-Faktor verschlechtert wird, da hier eine neue Zellkante zwischen der Zelle des Relay-Knotens und den Makrozellen geschaffen wurde.

7 Verwertung der erzielten Ergebnisse

Der erfolgreiche Abschluss der Arbeiten in EASY-C liefert eine Grundlage für die Definition von LTE-Advanced einer auf LTE aufbauenden neuen Mobilfunkgeneration. Die über EASY-C eingeführten Arbeiten bringen neue, teilweise revolutionäre Konzepte in den Mobilfunk-Standard ein und führen zu einer deutlichen Verbesserung der spektralen Effizienz und insbesondere der Fairness der Systeme.

Die Ergebnisse aus dem Projekt haben zu einer beschleunigten Aufnahme der LTE-Advanced Technologien in den Standardisierungsprozess geführt. Die gewonnenen Erkenntnisse helfen die am meisten zielführenden Ansätze zu identifizieren, damit kann ein optimierter Entwicklungsplan erstellt und Risiken vermieden werden. Dies führt zu einer Beschleunigung der Produktentwicklung, und letztlich zu einem besseren Angebot am Markt.

Die derzeit rasch steigende Nachfrage nach mobilen Diensten und nach erhöhter Dienstgüte kann nach Einführung von LTE Advanced dank der Ergebnisse aus dem Projekt besser bedient werden.

Kernelemente der entwickelten Algorithmen und Lösungen wurden standardisiert und zum Patent angemeldet.

Im Einzelnen wurde folgendes erreicht:

- Patente: Insgesamt über 30 Patente und Patentanmeldungen sind direkt auf die Arbeiten in EASY-C zurück zu führen bzw. sie bauen auf Ergebnissen von EASY auf.
- Veröffentlichungen: Bisher sind aus den Arbeiten zu EASY-C 24 Publikationen hervor gegangen. In einem Fall wurden mehrere Kapitel zu einem Buch über COMP beigetragen.
- Standardisierungsbeiträge: Bisher konnten mehr als 31 Beiträge zu 5 Themenfeldern bei den 3GPP Standardisierungsgremien eingebracht werden, die auf EASY-C Ergebnissen aufbauen.
- Öffentliche Demonstratoren: Nachweis der Funktion ausgewählter Ansätze durch vier verschiedene öffentliche Demonstratoren, die bei insgesamt 13 Anlässen ausgestellt wurden. Bei mehreren dieser Anlässe konnte ein breites Publikum erreicht werden, so beim Mobile World Congress, der CTIA oder bei der ICC.
- Funktionsnachweis für LTE als Baseline (peak data rates) aus den Referenzmessungen in EASY-C, in der Anfangsphase des Projekts.
- Nachweis der Realisierbarkeit und der Gewinne für Multi-user MIMO im Downlink aus Messungen und Systemsimulationen.
- Verfahren für eine effiziente Kanalrückmeldung bei MU-MIMO wurden entwickelt, diese wurden durch Systemsimulationen für verschiedene Fading-Szenarien und
- Nachweis der Realisierbarkeit von Multi-user MIMO im Uplink im Zusammenhang mit SIC (Successive Interference Cancellation) – Empfängern und der mit diesem Verfahren errichteten Gewinne aus Simulationen sowie aus Feldtests.
- Für die verwendeten SIC Empfänger konnten die Gewinne bei Designs mit begrenzter Komplexität gezeigt werden.

- Nachweis der Realisierbarkeit von COMP / Joint Detektion („Network MIMO“) im Uplink im Zusammenhang und der erzielbaren Gewinne aus Simulationen sowie aus Feldtests. Bei den abschließenden Test wurde Interferenz aus den Nachbarzellen einbezogen und deutliche Gewinne nachgewiesen.
- Ermittlung der bei COMP im Downlink erzielbaren Gewinne, sowie Bereitstellung von Lösungsansätzen für die wesentlichen technischen Hindernisse wie die Synchronisation der Antennen, Kanalschätzung und Kanalarückmeldung bei Frequenzduplex.
- Multizell Scheduling-Algorithmen für koordiniertes Beamforming (Co-Scheduling) wurden entwickelt und Ermittlung der Gewinne der Gewinne in Systemsimulationen
- Analyse der für die verschiedenen COMP-Verfahren gültigen Anforderungen an das Zugangsnetz hinsichtlich ihrer Bandbreite und Latenz auf den Verbindungen zwischen Basisstationen, dem erweiterten X2 interface.
- Die Ergebnisse zu den Algorithmen wurden projektübergreifend Dokumentation der Ergebnisse in einem Inventory-Dokument festgehalten.
- Vorbereitung für die Entwicklung effizienter Produkte und Lösungen durch die Bereitstellung von Systemanforderungen, von Systemdesigns und von Algorithmen.
- Bereitstellung von Daten und Konzepten als Grundlage für das System-design, die Planung von Standardisierung und Entwicklung durch quantitativen Vergleich der verschiedenen Ansätze hinsichtlich Kosten und Nutzen.

Die Ergebnisse der Arbeiten wurden innerhalb von Alcatel-Lucent verteilt, über das Intranet zugänglich gemacht und mit Experten aus den Systemdefinitions- und Entwicklungsbereichen diskutiert, bei welchen die Konzepte auf großes Interesse stießen an vielen Stellen in die Produktplanung eingeflossen sind.

Die Ergebnisse aus dem Projekt dienten als Grundlage für eine große Zahl von Veröffentlichungen (**Error! Reference source not found.** [VÖ-18]) ([VÖ-1] – [VÖ-29]) die die theoretischen, simulativen und experimentellen Ergebnisse zu Themen LTE-Advanced, MIMO und COMP wiedergeben. Schließlich seien noch die zahlreichen Beiträge von Alcatel-Lucent Autoren zu einem Buch über kooperative Verfahren **Error! Reference source not found.** ([VÖ-3]) genannt, die nahezu ausschließlich auf Ergebnissen aus dem Projekt EASY-C beruhen.

Durch die aktive und kontinuierliche Mitarbeit von Teammitgliedern bei der Standardisierung wurden im Projekt erarbeitete Ergebnisse in die Standardisierung für zukünftige Mobilfunksysteme insbesondere 3GPP Release 10 und folgende einzubringen und gleichzeitig eine sanfte Migration vom 3GPP Release 8 Standard aus zu erreichen. Das Einbringen der im Projekt erarbeiteten Verfahren in die aktuellen "study items" und „work items" in der 3GPP Standardisierung stellen einen wichtigen Beitrag zur Weiterentwicklung des LTE Systems und Algorithmen Richtung LTE Advanced dar. In umgekehrter Richtung half die zeitnahe Analyse der Entscheidungen von 3GPP, die hohe Relevanz der bei EASY-C erzielten Ergebnisse zu garantieren.

In einem ersten Beitrag im RAN-Plenary Meeting **Error! Reference source not found.** ([3GPP-30]) wurden die Ergebnisse der frühen Arbeiten zur Analyse und zur Klassifizierung der Verfahren präsentiert. Dieser Vortrag gab auch eine Reihenfolge der Entwicklung aus EASY-C Sicht vor, der den Verlauf der Standardisierung in den Folgejahren weitgehend zutreffend beschreibt.

In der Folge konnten bislang über 30 Beiträge mit EASY-C Inhalten bei 3GPP eingebracht werden. Die Standardisierung zu COMP wird mit Release fortgeführt, es sind daher noch weitere Beiträge zu erwarten, die zumindest in Teilen noch auf Ergebnisse aus EASY-C aufbauen.

Die erfolgreiche Entwicklung und Demonstration der Systemkonzepte und Algorithmen für LTE-Advanced wird dazu beitragen, die Wettbewerbsfähigkeit sowohl der Hersteller für Telekommunikationstechnik als auch der Betreiber und Dienste-Anbieter in Deutschland zu stärken und dadurch auch die Beschäftigungssituation zu verbessern.

Im Projekt sind vier Familien von Demonstratoren entstanden, die bei zahlreichen öffentlichen Anlässen gezeigt werden konnten. Diese Demonstratoren wurden im Laufe des Projekts weiterentwickelt und verfeinert. Diese Aufbauten sind in erster Linie als Testaufbauten zu Meßzwecken konzipiert wurden, damit konnten in den Demonstrationen auch tiefer gehende quantitative Zusammenhänge gezeigt werden. Die Demonstratoren zu Uplink Multi-User MIMO und COMP waren unseres Wissens die ersten LTE System-nahen Versuche ihrer Art.

Insbesondere die Vorführungen auf dem Mobile World Congress in den Jahren 2007 bis 2010 sind auf reges Interesse gestoßen und auf der ICC 2009 in Dresden und haben stark zur öffentlichen Sichtbarkeit der Firma Alcatel-Lucent und des Projekts EASY-C beigetragen. Es wurde überzeugend gezeigt, dass Techniken wie UL COMP und MU MIMO realisierbar und zielführend sind. Auf diese Weise wurde die Akzeptanz für LTE-advanced Technologien gefördert.

8 Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

MIMOWA

Im MEDEA+ Forschungsprojekt MIMOWA untersucht Alcatel-Lucent in Simulationen Algorithmen auf Link- und System-Ebene für die in 3GPP LTE Release 8 standardisierten Übertragungsverfahren und Feedbackmechanismen. Nach Bewertung der einzelnen Verfahren auf Link- und Systemebene lag der Schwerpunkt auf der Optimierung von Umschaltkriterien zwischen den einzelnen Verfahren sowie der Untersuchung von Link-Adaptions-Methoden. Die Umschaltkriterien sowie die Link-Adaption sollen auf die in LTE Rel. 8 standardisierten Feedbackmechanismen abgestimmt werden, um Aussagen zur Leistungsfähigkeit des realen Systems treffen zu können. Ergebnisse und Erfahrungen aus MIMOWA wurden soweit möglich in den Simulationsaktivitäten von EASY-C berücksichtigt.

WINNER +

Das CELTIC-Forschungsprojekt WINNER+ setzt auf den europäischen FP6 Projekten WINNER I & II auf; das Konsortium setzt sich aus europäischen Herstellern, Netzwerkbetreibern und Universitäten zusammen. Auf Basis des „WINNER basic system concept“ wird WINNER+ Technologien entwickeln, optimieren und evaluieren, die IMT-Advanced konform sind. Innovationsschwerpunkte sind unter anderem in den Themenbereichen radio resource management (einschließlich Interferenzkoordinierung), heterogene Netze einschließlich Relaying und verbesserter Mehrantennenkonzepte, flexibler Spektrumsnutzung und network coding zu finden.

Alcatel-Lucent Deutschland ist als WINNER+ Partner in erster Linie in der Task 1.4 "Advanced Multiple Antenna Systems" aktiv und untersucht dort schwerpunktmäßig Algorithmen für Mehrantennensysteme mit standortübergreifender Koordination und adaptives Umschalten zwischen MIMO-Verfahren mit unterschiedlichen Anforderungen an den Interzell-Datenaustausch. Die in WINNER+ gewonnenen Ansätze können somit in das EASY-C SoA3-Programm mit einfließen.

ARTIST-4G

Das ARTIST4G-Projekt im Rahmen des EU-FP7-Programms setzt bei der Tatsache an, dass trotz vieler Fortschritte bei der Übertragungsqualität im LTE-Standard nach wie vor eine große Diskrepanz zwischen Spitzen-Übertragungsraten und Zellrand-Durchsatz besteht. Ziel ist es, durch neuartige Verfahren der Interferenzvermeidung, der Interferenzausnutzung sowie moderner Relay-Techniken eine gleichmäßigere und insgesamt noch höhere Übertragungsqualität im gesamten Netz und damit eine gleichmäßigere Verfügbarkeit der Dienste für den Teilnehmer zu erreichen. Gleichzeitig werden dabei auch die damit verbundenen Anforderungen an die Backhaul-Netzarchitektur und daraus resultierende Systemkonzepte betrachtet. In ARTIST4G arbeiten 15 Partner (Netzbetreiber, Hersteller, Universitäten und Forschungseinrichtungen) aus 8 europäischen Ländern zusammen, wobei einige der deutschen Partner bereits in EASY-C beteiligt waren. Viele der in EASY-C erarbeiteten grundlegenden Ergebnisse auf dem Gebiet der Übertragungsverfahren, der Sende- und Empfangsalgorithmen sowie die Erfahrungen mit den dort entstandenen Feldtest-Plattformen und die Ergebnisse der Feldmessungen dienen ARTIST4G als Basis für die Weiterentwicklung in Richtung Bereitstellung homogenerer Übertragungsqualität in der gesamten Zelle und Entwicklung dafür geeigneter neuer Systemkonzepte. Derzeit (Stand März 2011) liegen bereits Beschreibungen und theoretische Analysen einer Vielzahl von Konzepten und Netzarchitekturen vor, die im weiteren Verlauf des Projektes weiter detailliert untersucht werden. Eine Auswahl dieser Verfahren soll dann in Labor- und Feldtests demonstriert und verifiziert werden.

9 Anlage: Veröffentlichungen und Standardisierung

9.1 Veröffentlichungen

- [VÖ-1] T. Wild, "A rake-finger based efficient channel state information feedback compression scheme," in Proceedings of the IEEE VTC spring 2010
- [VÖ-2] Mark Doll, Downlink Coordinated Scheduling – Simulation Results. 33. Tagung der VDE/ITG-Fachgruppe 5.2.4 Mobilität in IP-basierten Netzen, Heidelberg, 8. Juli 2010.
- [VÖ-3] Patrick Marsch, Gerhard Fettweis (Editors), Coordinated Multi-Point in Wireless Communications – From Theory To Practice, Cambridge University Press, not yet published status March 2011.
Abschnitte darin mit Autoren von Alcatel-Lucent:
 - 5.3 "Downlink Coordinated Beamforming", Chan-Byoung Chae, Doru Calin
 - 6.3 "Downlink Distributed CoMP approaching Centralized Joint Transmission", Federico Boccardi
 - 12.3 "CoMP Backhaul Infrastructure Concepts", Torsten Fahldieck, Mark Doll
 - 13.1 "Real-time Implementation and Trials of Advanced Receiver and Uplink CoMP Schemes", Uwe Dötsch, Johannes Koppenborg
 - 13.5 "Lessons Learnt Through Field Trials", Hans-Peter Mayer
 - 14.1 "Simulation and Link-2-System Mapping Methodology", Thorsten Wild, Andreas Weber
 - 14.4 "Downlink Simulation", Mark Doll, Thorsten Wild
- [VÖ-4] M. Schmidt, N. Ahr, V. Braun und H-P. Mayer, "Performance of QoS- and channel-aware packet scheduling for LTE downlink", 29. Treffen der VDE/ITG-Fachgruppe 5.2.4, 12. Februar 2009, RWTH Aachen

- [VÖ-5] M. Ohm, "Frequency-Selective Precoding With Low Restricted Feedback Bit Rate in Mobile OFDM Based Systems With MIMO Spatial Multiplexing", Proc. 12th International OFDM-Workshop, pp. 100-104, Hamburg, Germany, Aug. 2007.
- [VÖ-6] M. Ohm, M. Litzemberger, "MIMO in 3GPP LTE", Proc. 1st Workshop on Commercial MIMO-Components and -Systems (CMCS), Duisburg, Germany, Sept. 2007.
- [VÖ-7] A. Weber, Performance Studies on LTE Advanced in the Easy-C Project, 27. Treffen der VDE/ITG-Fachgruppe 5.2.4 Mobilität in IP-basierten Netzen, Stuttgart, 19. Juni 2007.
- [VÖ-8] M. Ohm "SIC receiver in a mobile MIMO-OFDM system with optimization for HARQ operation", 13th International OFDM Workshop (InOWo '08), Hamburg, August 27-28, 2008, (oral presentation)
- [VÖ-9] M. Ohm, "Technologies for LTE-Advanced", Wireless Communication and Information '08, Berlin, Oktober 16-17, 2008
- [VÖ-10] M. Boldi, T. Svenson, T. Wild, M. Olson, A. Osseiran, A. Tölli, H. Pennanen, N. Seifi, "Coordinated MultiPoint Systems for IMT-Advanced in the Framework of Winner+ Project", ICT Mobile summit 2009, June 10-12
- [VÖ-11] T. Wild, "A rake-finger based efficient channel state information feedback compression scheme", IEEE VTC spring 2010, Taipei, May 16-19, 2010
- [VÖ-12] F. Boccardi, V. Braun, O. Stanze, M. Baker, A. Tulino, and A. Weber, "An industrial perspective of relaying for cellular systems" Invited paper, Asilomar, Nov. 2010
- [VÖ-13] R. Irmer, H-P. Mayer, A. Weber, V. Braun, M. Schmidt, M. Ohm, N. Ahr, A. Zoch, C. Jandura, P. Marsch; G. Fettweis, "Multisite field trial for LTE and advanced concepts", Communications Magazine, IEEE Volume 47, Issue 2, February 2009 Page(s):92 - 98
- [VÖ-14] M. Schmidt, N. Ahr, V. Braun und H-P. Mayer, "Performance of QoS- and channel-aware packet scheduling for LTE downlink", 29. Treffen der VDE/ITG-Fachgruppe 5.2.4, 12. Februar 2009, RWTH Aachen
- [VÖ-15] The LTE/SAE trial initiative: Taking LTE-SAE from specification to rollout, J. Robson, LSTI (Alcatel-Lucent et al) ; Communications Magazine, IEEE volume: 47 , Issue: 4 Publication Year: 2009 , Page(s): 82 – 88
- [VÖ-16] P. Jung, J. Schreck, G. Wunder, and M. Ohm. Approximation of non-separable utilities for feedback and user selection in a multiantenna downlink channel, 2009.
- [VÖ-17] J. Schreck, P. Jung, G. Wunder, M. Ohm, and H.-P. Mayer. Limited feedback in multiuser MIMO OFDM systems based on rate approximation. In IEEE Global telecommunications Conference, GLOBECOM '09., 2009b.
- [VÖ-18] M. Schmidt, L. Schoenerstedt, A. Weber, "System-level Analysis of Inter-cell Interference Coordination for SoA-2, Vortrag auf dem EASY-C-Meeting October 2008
- [VÖ-19] Hans-Peter Mayer, "Multi antenna systems for LTE advanced - An overview on the options", WSA workshop Berlin, Feb. 17-18, 2009, keynote talk held
- [VÖ-20] R. Irmer, H. Droste, P. Marsch, M. Grieger, G. Fettweis, S. Brueck, H.-P. Mayer, L. Thiele und V. Jungnickel, "Coordinated Multipoint: Concepts, Performance, and Field Trial Results", IEEE Communications Magazine, Volume 49, Issue 2, pp. 102-111, Feb. 2011
- [VÖ-21] G. Wunder, J. Schreck, P. Jung, H. Huang, and R. Valenzuela, "Rate approximation: A new paradigm for multiuser MIMO downlink communications," IEEE International Conference on Communications (ICC 2010), May 2010
- [VÖ-22] G. Wunder, J. Schreck, A Robust Transmission Technique for the LTE Downlink, ISWCS

- [VÖ-23] J. Schreck, P. Jung, and G. Wunder, Approximation of Multiuser Rates in MIMO OFDM Downlink Systems, 14th International OFDM-Workshop, 2009
- [VÖ-24] Alcatel-Lucent, "Evaluation of Dresden Channel Sounding Data", 16th April 2010, Public workshop in Dresden
- [VÖ-25] EASY-C_PubWS-2010-04_UL_MIMO_SIC_poster.pdf WP2, Detlef Hartmann, Johannes Koppenborg, "UL MU MIMO Performance with SIC receiver", 16.4.2010, Public Workshop, Dresden
- [VÖ-26] EASY-C_PubWS-2010-04_UL_CoMP_poster.pdf WP2, Johannes Koppenborg, "LTE advanced UL comp trial", 16.4.2010, Public Workshop, Dresden
- [VÖ-27] EASY-C_Pub_WS_Poster_ALU.ppt WP2, Volker Braun, "Multi-Site MIMO Field Trials", 05.12.2008, Dresden
- [VÖ-28] Uwe Dötsch, Johannes Koppenborg, "Uplink Coordinated Multipoint - Simulation and Field Trial Results", VDE/ITG workshop IMT Advanced, 08. Juli 2010, Heidelberg

9.2 Beiträge zu 3GPP

- [3GPP-1] R1-083759, Alcatel-Lucent, "UE PMI feedback signalling for user pairing/coordination", 3GPP TSG RAN WG1 #54bis, Prague, Czech Republic, September 2008.
- [3GPP-2] R1-084141, Alcatel-Lucent, "UE PMI feedback signalling for user pairing/coordination", 3GPP TSG RAN WG1 #55 Meeting, Prague, Czech Republic, 10. –14. November 2008 (resubmission)
- [3GPP-3] R1-090051, Alcatel-Lucent, "UE PMI feedback signalling for user pairing/coordination", 3GPP TSG RAN WG1 #55bis Meeting, Ljubljana, Slovenia, 12. –16. January 2009 (resubmission)
- [3GPP-4] R1-090777, Alcatel-Lucent, 'UE PMI feedback signalling for user pairing/ coordination', 3GPP TSG RAN WG1 #56, Athens, Greece, February 9 – 13, 2009 (resubmission)
- [3GPP-5] R1-090926, Alcatel-Lucent, "Best Companion reporting for improved single-cell MU-MIMO pairing", TSG RAN WG1 #56, Athens, Greece, February 2009
- [3GPP-6] R1-091307, Alcatel-Lucent, "Best Companion reporting for improved single-cell MU-MIMO pairing", 3GPP TSG RAN WG1 #56bis Meeting Seoul, Korea, March 23 – 27, 2009 (resubmission)
- [3GPP-7] R1-092031, Alcatel-Lucent, "Best Companion reporting for improved single-cell MU-MIMO pairing", 3GPP TSG RAN WG1 #57 Meeting San Francisco, USA, May 4 – 8, 2009 (resubmission)
- [3GPP-8] R1-092546, Alcatel-Lucent, "Best Companion reporting for improved single-cell MU-MIMO pairing", 3GPP TSG RAN WG1 #57bis Meeting Los Angeles, USA, June 29 – July 3, 2009 (resubmission)
- [3GPP-9] R1-093333 3GPP, Alcatel-Lucent, "Best Companion reporting for improved single-cell MU-MIMO pairing", TSG RAN WG1 #58 Meeting, Shenzhen, China, August 24 – 28, 2009 (resubmission)
- [3GPP-10] R1-091751, Alcatel-Lucent, "Definition of Backhaul according to Level of Cooperation in CoMP UL", TSG RAN WG1 #57bis, San Francisco, USA, May 2009

- [3GPP-11] R1-092298, Alcatel-Lucent, "Definition of Backhaul according to Level of Co-operation in CoMP UL", 3GPP TSG-RAN WG1 Meeting #57bis, Los Angeles, USA; 29th June – 03rd July 2009 (resubmission)
- [3GPP-12] R1-093019, Alcatel-Lucent, "Definition of Backhaul according to Level of Co-operation in CoMP UL", 3GPP TSG-RAN WG1 Meeting #58, Shenzhen, China; 24th – 28th August 2009 (resubmission)
- [3GPP-13] R1-091252, Alcatel-Lucent, "Estimation of extended PMI feedback signaling required for user intra-cell and inter-cell coordination", 3GPP TSG RAN WG1 #56bis Meeting Seoul, Korea, 23. –27. March 2009
- [3GPP-14] R1-091782, Alcatel-Lucent, "Estimation of extended PMI feedback signaling required for user intra-cell and inter-cell coordination", 3GPP TSG RAN WG1 #57, San Francisco, USA, May 2009 (resubmission)
- [3GPP-15] R1-092540, Alcatel-Lucent, "Estimation of extended PMI feedback signaling required for user intra-cell and inter-cell coordination", 3GPP TSG RAN WG1 #57bis Meeting Los Angeles, CA, USA, 29. June – 3. July 2009 (resubmission)
- [3GPP-16] R1-093015, Alcatel-Lucent, "Estimation of extended PMI feedback signaling required for user intra-cell and inter-cell coordination", 3GPP TSG RAN WG1 #58 Meeting Shenzhen, China, 24. August – 28. August 2009 (resubmission)
- [3GPP-17] R1-093780, Alcatel-Lucent, "Estimation of extended PMI feedback signaling required for user intra-cell and inter-cell coordination", 3GPP TSG RAN WG1 #58bis Meeting Miyazaki, Japan, 12. October – 16. October 2009 (resubmission)
- [3GPP-18] R1-094614, Alcatel-Lucent, "Estimation of extended PMI feedback signaling required for user intra-cell and inter-cell coordination", 3GPP TSG RAN WG1 #59 Meeting, Jeju, Korea, 9. November – 13. November 2009 (resubmission)
- [3GPP-19] R1-100419, Alcatel-Lucent, "Estimation of extended PMI feedback signaling required for user intra-cell and inter-cell coordination", 3GPP TSG RAN WG1 #59bis Meeting, Valencia, Spain, 18. January – 22. January 2010 (resubmission)
- [3GPP-20] R1-092541, Alcatel-Lucent, "Consideration on performance of coordinated beamforming with PMI feedback", TSG RAN WG1#57bis, Los Angeles, USA, July 2009
- [3GPP-21] R1-093016, Alcatel-Lucent, "Consideration on performance of coordinated beamforming with PMI feedback", 3GPP TSG RAN WG1 #58 Meeting Shenzhen, China, 24. August – 28. August 2009 (resubmission)
- [3GPP-22] R1-093781, Alcatel-Lucent, "Consideration on performance of coordinated beamforming with PMI feedback", 3GPP TSG RAN WG1 #58bis Meeting Miyazaki, Japan, 12. October – 16. October 2009 (resubmission)
- [3GPP-23] R1-094615, Alcatel-Lucent, "Consideration on performance of coordinated beamforming with PMI feedback", 3GPP TSG RAN WG1 #59 Meeting Jeju, Korea, 9. November – 13. November 2009 (resubmission)
- [3GPP-24] R1-100420, Alcatel-Lucent, "Consideration on performance of coordinated beamforming with PMI feedback", 3GPP TSG RAN WG1 #59bis Meeting Valencia, Spain, 18. January – 22. January 2010 (resubmission)
- [3GPP-25] R1-092542, Alcatel-Lucent, "Uplink multi-point reception performance results for LTE-A", 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #57, San Francisco, USA, June 2009.
- [3GPP-26] R1-092944, Alcatel-Lucent, "Uplink multi-point reception performance results for LTE-A", 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #57bis, Los Angeles, USA, 29th June – 3rd July, 2009 (resubmission)
- [3GPP-27] R1-093017, Alcatel-Lucent, "Uplink multi-point reception performance results for LTE-A", 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #58 Shenzhen, China, 24. August – 28. August 2009 (resubmission)

- [3GPP-28] R1-100928, Alcatel-Lucent, "Performance of coordinated beamforming with multiple PMI feedback", 3GPP TSG RAN WG1 #60 Meeting, San Francisco, USA, 22. February – 26. February 2010
- [3GPP-29] R1-100944, Alcatel-Lucent, "Performance of coordinated beamforming with multiple PMI feedback", Alcatel-Lucent, 3GPP TSG RAN WG1 #61, USA, February 2010. (resubmission)
- [3GPP-30] REV-080048, Alcatel-Lucent, "LTE - IMT advanced-Candidate Technologies" 3GPP TSG RAN IMT Advanced Workshop, Shenzhen, China, April 2008
- [3GPP-31] R1-073937, Alcatel-Lucent, "Comparison aspects of fixed and adaptive beamforming for LTE downlink" 3GPP TSG RAN WG1 #50bis Shanghai, China, October 2007

10 Anlage: Referenzen und Abkürzungen

10.1 Referenzen

- [1] D.G. Brennan, „Linear Diversity Combining Techniques“, in Proceedings of the IRE, vol. 47, June 1959, pp. 1075-1102
- [2] C. A. Baird and C. L. Zahm, "Performance criteria for narrowband array processing," in Decision and Control, 1971 IEEE Conference on, vol. 10, December 1971, pp. 564–565.
- [3] S.P. Applebaum, D.J. Chapman, „Adaptive arrays with main beam constraints“ in Proceedings of IEEE Trans. On AP, Vol. AP-24, pp. 650-662, Sept. 1976
- [4] S.M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol.16, no.8, pp.1451-1458, Oct 1998
- [5] G.J. Foschini, "Layered Space-Time Architecture for Wireless Communication in a Fading Environment When Using Multiple Antennas", Bell Laboratories Technical Journal, Vol. 1, No. 2, Autumn, 1996, pp. 41-59
- [6] S. Shamai and B. Zaidel, "Enhancing the cellular downlink capacity via co-processing at the transmitting end," in Vehicular Technology Conference, 2001. VTC 2001 Spring. IEEE VTS 53rd, 2001.
- [7] Venkatesan, S.; Lozano, A.; Valenzuela, R.; , "Network MIMO: Overcoming Intercell Interference in Indoor Wireless Systems," Signals, Systems and Computers, 2007. ACSSC 2007. Conference Record of the Forty-First Asilomar Conference on , vol., no., pp.83-87, 4-7 Nov. 2007
- [8] V. Braun et al., LTE Prototype Specs, Phase D2.4, March 2008
- [9] V. Braun et al., LTE Prototype Specs, Phase SoA1, March 2008
- [10] V. Braun et al., LTE Prototype Specs, Phase SoA2, Nov. 2009
- [11] C. Haase and H. Heimpel, LTE Interfaces between Baseband Board and Receiver / Transmitter for RRH, Ed00P05, Jan. 2009
- [12] EASY-C WG1 SWG "System Requirements and KPI", „System Requirements and Key Performance Indicators“, EASY-C internal report, v0.32, Februar 2008.
- [13] Mark Doll, Downlink Coordinated Scheduling – Simulation Results. 33. Tagung der VDE/ITG-Fachgruppe 5.2.4 Mobilität in IP-basierten Netzen, Heidelberg, 8. Juli 2010.
- [14] Patrick Marsch, Gerhard Fettweis (Hrsg.), Coordinated Multi-Point in Wireless Communications – From Theory To Practice, Cambridge University Press, Veröffentlichung voraussichtlich 2011.
- [15] 3GPP R1-083759, "UE PMI feedback signalling for user pairing/coordination", Alcatel-Lucent, 3GPP TSG RAN WG1 #54bis, Prague, Czech Republic, September 2008.
- [16] Mark Doll, Torsten Fahldieck (Hrsg.), Backhaul Requirements for CoMP, EASY-C-internes Dokument der X2 Special Group, 17. September 2010.
- [17] Mark Doll (Editor), Backhaul Technologies for CoMP, EASY-C internes Dokument der X2 Special Group, 17. September 2010.
- [18] The LTE/SAE Trial Initiative; www.lstforum.com

- [19] LSTI, "Latest Results from the LSTI," Feb. 2009;
http://www.lstforum.com/file/news/Latest_LSTI_Results_Feb09_v1.pdf
- [20] J. Robson, The LTE/SAE trial initiative: Taking LTE-SAE from specification to roll-out, IEEE Communications Magazine, Vol. 47, Issue 4, pp. 82-88, April 2009
- [21] R. Irmer, H.-P. Mayer, A. Weber, V. Braun, M. Schmidt, M. Ohm, N. Ahr, A. Zoch, C. Jandura, P. Marsch, and G. Fettweis, Multisite field trial for LTE and advanced concepts, IEEE Communications Magazine, Volume 47, Issue 2, pp. 92-98, Feb. 2009
- [22] S. Jaeckel et al., Multicell Relay Measurements Part 1: Backhaul Link, Technical Report, March 2011.
- [23] S. Jaeckel et al., Multicell Relay Measurements Part 2: Access Link, Technical Report, March 2011.
- [24] M.K. Karakayali, G. Foschini and R.A. Valenzuela, "Network coordination for spectrally efficient communication in cellular systems", IEEE Wireless Communications, August 2006, pp. 56-61
- [25] F. Boccardi and H. Huang. A near-optimum technique using linear precoding for the mimo broadcast channel. In Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing ICASSP 2007, volume 3, pages III-17-III-20, 15-20 April 2007. doi: 10.1109/ICASSP.2007.366461
- [26] F. Boccardi, H. Huang, and M. Trivellato. Multiuser eigenmode transmission for mimo broadcast channels with limited feedback. In Proc. IEEE 8th Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications SPAWC 2007, pages 1-5, 2007. doi: 10.1109/SPAWC.2007.4401394
- [27] A. Sezgin, P. Jung, M. Schellmann, H. Halbauer, and R. Muenzner. On the impact of mobility on the channel estimation in WiMAX OFDMAUplink. The 17th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC-06), 2006.
- [28] M. Trivellato, F. Boccardi, and H. Huang. Zero-forcing vs unitary beamforming in multiuser mimo systems with limited feedback. In Proc. IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications PIMRC 2008, pages 1-6, Sept. 15-18, 2008. doi: 10.1109/PIMRC.2008.4699777.
- [29] G. Wunder, C. Wang, P. Jung, P. Bune, C. Gerlach, and M. Litzenburger. Practical Channel Estimation Schemes for 3GPP OFDM New Air Interface. Technical report, Fraunhofer German-Sino Lab for Mobile Communications - MCI, 2005

10.2 Abkürzungen

3GPP	3rd Generation Partnership Project
3GPP2	3rd Generation Partnership Project 2
AG	Arbeitsgruppe(n)
ALU	Alcatel-Lucent
AP	Arbeitspaket(e)
API	Application Interface
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
COMP	Co-operative transmission / reception
CQI	Channel Quality Indicator
DL	Downlink
DMB	Digital Multimedia Broadcasting
DSP	Digital Signal Processor
DVB	Digital Video Broadcasting

DxB	Digital Broadcasting
EASY	Enablers for Ambient Services and sYstems
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EVDO	Evolution-Data Optimized
FPGA	Field Programmable Gate Array
GSM	Global System for Mobile Communications
HARQ	Hybrid Automatic Repeat Request
HSPA	High Speed Packet Access
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFDMA	Interleaved Frequency Division Multiple Access
KPI	Key Performance Indicators
LDPC	Low Density Parity Check [Codes]
LTE	Long Term Evolution
LSTI	LTE/SAE Trial Initiative
MAC	Media Access Control
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service
MIMO	Multiple Input Multiple Output (<i>im Bezug auf Mehrfachantennensysteme</i>)
NGMN	Next Generation Mobile Networks
NodeB	Bezeichnung einer Basisstation in einem UMTS-Mobilfunksystem
OEM	Original Equipment Manufacturer
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiple Access
OSI	Open Systems Interconnect
QoS	Quality of Service
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PHY	Physical Layer
PoC	Proof of Concept
RAN	Radio Access Network
RRC	Radio Resource Control
RRH	Remote Radio Head
RRM	Radio Resource Management
SAE	System Architecture Evolution
SC-FDMA	Single Carrier – Frequency Division Multiple Access
SIR	Signal-Interferenz-Leistungsverhältnis
SoA	Set of Algorithms (<i>Satz von Algorithmen für eine Testkampagne</i>)
SoC	System on Chip
SVC	Scalable Video Codec
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
VHDL	Very High Speed Integrated Circuit Hardware Description Language
VLIW	Very Long Instruction Word
VoIP	Voice over Internet Protocol
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WWRF	Wireless World Research Forum