

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht zum Teilvorhaben
3. Titel CONDOR (Converged Heterogeneous Metro/Access Infrastructure), Teilvorhaben CONDOR@HHI (Netzwerk-Architekturen für optische Zugangsnetze mit Backhaul für „coordinated multi point“ (CoMP) Funknetze und DWDM-Quellen und Komponenten für OFDM-Systeme)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.3.2013
	6. Veröffentlichungsdatum 22.11.2013
	7. Form der Publikation Projektabschlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut	9. Ber. Nr. Durchführende Institution entfällt
	10. Förderkennzeichen 16BP1012
	11. Seitenzahl 35
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 33
	14. Tabellen 6
	15. Abbildungen 45
16. Zusätzliche Angaben keine	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) entfällt	
18. Kurzfassung Das Vorhaben hat die Integration von Mobilfunk und Zugangsnetz untersucht, wobei in AP1 die Anforderungen aus Sicht des Mobilfunks und die Netzarchitektur im Mittelpunkt standen. In AP3 und AP5 wurden DWDM Quellen und hochlineare Laser entwickelt, die zur Realisierung des Konzepts notwendig sind. Die Ergebnisse unterstützen die übergeordneten Ziele des Verbundvorhabens, und stellen wegweisende Beiträge zum Gesamtkonzept dar, die im Konsortium umfassend diskutiert und von den Partnern weiterverfolgt bzw. im Demonstrator eingesetzt wurden. Methodisch wurden in AP1 zunächst theoretische Analysen durchgeführt. Ein geeignetes Netzkonzept wurde entwickelt, die CoMP Algorithmen wurden noch einmal wesentlich verbessert, und in die statistische Auswertung wurde erstmals das Backhaul mit einbezogen. In AP3 und AP5 wurden neue optische Komponenten hergestellt, umfassend charakterisiert und den Partnern zur Verfügung gestellt. Alle Projektziele konnten erreicht werden. Neben vielen Teilergebnissen können das fundierte Verständnis des Backhails im zukünftigen Mobilfunk, eine geeignete Netzwerkarchitektur, der abstimmbare DWDM Laser und die lineare Quelle für OFDM herausgestellt werden. Die Projektergebnisse haben den Stand der Technik wesentlich weiterentwickelt, was durch die Vielzahl an Publikationen, Abschlussarbeiten und dem Interesse der Industrie an den Ergebnissen während und nach dem Vorhaben deutlich wird.	
19. Schlagwörter Backhaul, Coordinated Multipoint, Open Network, DWDM, abstimmbare Laser, OFDM	
20. Verlag IEEE, ITG, EURASIP, IET, J. Wiley & Sons, VDE, OSA	21. Preis entfällt

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. type of document (e.g. report, publication) Final report
3. title CONDOR (Converged Heterogeneous Metro/Access Infrastructure), Teilvorhaben CONDOR@HHI (Netzwerk-Architekturen für optische Zugangsnetze mit Backhaul für „coordinated multi point“ (CoMP) Funknetze und DWDM-Quellen und Komponenten für OFDM-Systeme)	
4. author(s) (family name, first name(s)) Volker Jungnickel, Michael Schlosser, Holger Klein, Martin Moehrle	5. end of project 31.3.2013
	6. publication date 22.11.2013
	7. form of publication Final Project Report
8. performing organization(s) (name, address) Fraunhofer Heinrich Hertz Institute	9. originator's report no. Not applicable
	10. reference no. 16BP1012
	11. no. of pages 35
12. sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. no. of references 33
	14. no. of tables 6
	15. no. of figures 45
16. supplementary notes none	
17. presented at (title, place, date) Not applicable	
18. abstract The project studied the integration of mobile radio and access networks. In AP1, the requirements from mobile radio perspective were considered and a suitable architecture was developed. In AP3 and AP5, DWDM Lasers and highly linear Lasers for OFDM were developed that are needed to implement the concept. The results support the superordinate goals of the collaborative project and provide seminal contributions to the overall concept. They were discussed in the consortium in detail and further developed by project partners or used in the demonstrator. Regarding methods, in AP1 theoretical Analysis were made. A suitable network concept was made, CoMP algorithms were significantly improved, and in the statistics, the backhaul was included for the first time. In AP3 and AP5, new optical componenets were developed, manufactured and comprehensivley charakterized and supplied to the project partners. All project goals were reached. Besides many detailed results, the profound understanding of future mobile backhaul requirements and an appropriate network architecture, the widely tunable DWDM laser and the highly linear laser source for OFDM can be highlighted. These results have significantly advanced the state of the art, as this is obvious by many international publications, academic thesis and the interest in industry in the results during and after the project.	
19. keywords Backhaul, Coordinated Multipoint, Open Network, DWDM, tunable Laser, OFDM	
20. publisher IEEE, ITG, EURASIP, IET, J. Wiley & Sons, VDE, OSA	21. price Not applicable

Projektabschlussbericht CONDOR

Berichtszeitraum: 1. April 2010 - 31. März 2013

CONDOR

Converged Heterogeneous Metro/Access Infrastructure

Zuwendungsempfänger: **Fraunhofer-Institut Nachrichtentechnik - Heinrich-Hertz-Institut (HHI) Berlin**
HHI-Teilprojekt: **DWDM-Quellen und Komponenten für OFDM-Systeme**
Förderkennzeichen: **16BP1012**
Laufzeit des Vorhabens: **01.04.2010 bis 31.03.2013**

1. Aufgabenstellung des Teilvorhabens

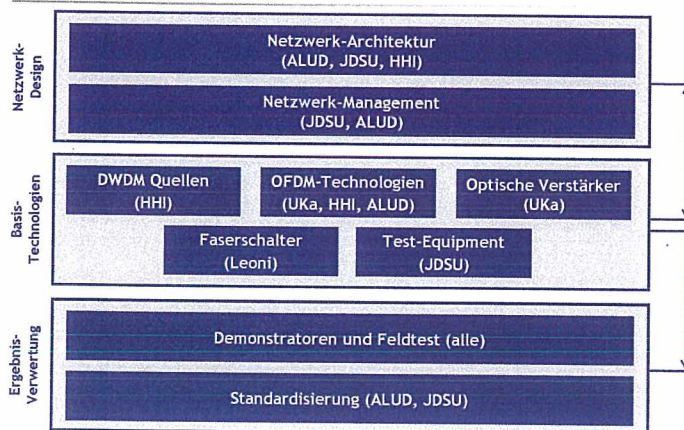
Das Gesamtziel des Teilvorhabens

CONDOR@HHI

(Netzwerk-Architekturen für optische Zugangsnetze mit Backhaul für „coordinated multi point“ (CoMP) Funknetze und DWDM-Quellen und Komponenten für OFDM-Systeme)

ergibt sich aus den übergeordneten Zielen des Verbund-Projekts „Converged Heterogeneous Metro/Access Infrastructure“ (s. Verbund-Beschreibung CONDOR), zu deren Erreichung dieses Teilvorhaben durch die im Folgenden beschriebene Aufgabenstellung maßgeblich beigetragen hat. Die durchgeführten Arbeiten in CONDOR@HHI gliedern sich entsprechend der unten stehenden Skizze in die Arbeiten des Verbunds ein.

Projektstruktur, Partnerbeiträge



Dabei wurden vom FhG-HHI innerhalb des Verbundprojektes folgende Teilaufgaben übernommen:

- AP1 Netzwerk-Architektur
 - T1.2: Optische Netzarchitektur und Technologiespezifikationen
 - T1.4: Backhauling-Architekturen für CoMP
- AP3 DWDM-Laser
 - T3.1: Gain-Chips und abstimmbare Polymergitter für Wellenlängenabstimmbare 10Gb/s fähige Laserdioden
 - T3.2: Hybrid-integrierter 10 Gb/s, λ -abstimmbaren Laser
- AP5: OFDM-Technologien
 - T5.2: Entwicklung linearer Laser- und Photodioden für Subträgerbandtechnik

Das HHI beteiligte sich mit drei Abteilungen an dem Projekt. Die Abteilungen „Photonic Networks and Systems“ (PN) und „Wireless Communications and Networks“ (WN) haben die Integration von Mobilfunknetz und Festnetz bearbeitet. Die Abteilung „Photonic Components“ (PC) hatte die Aufgabe, ausgewählte optische Schlüsselkomponenten zu entwickeln, die zur Realisierung der untersuchten Systeme erforderlich sind.

Im AP1 wurde die Netzarchitektur untersucht. Zukünftige Mobilfunksysteme (LTE-Advanced) setzen eine komplexe Backbonearchitektur voraus. Diese besteht zum einen aus einem sternförmigen Feedernetz (S1), ausgehend von einem sog. advanced gateway (aGW) zu jeder Basisstation (BS), siehe Abb. 1, links. Zum anderen gibt es logische Direktverbindungen zwischen benachbarten BS, die zusammen ein vermaschtes Signalisierungsnetz bilden (X2).

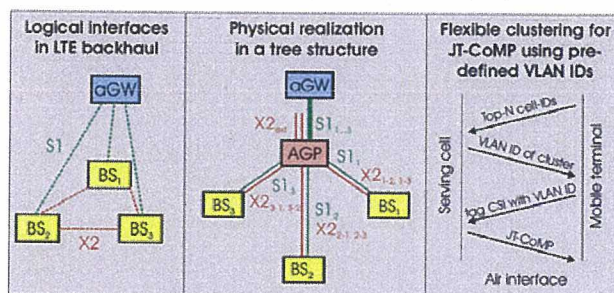


Abb. 1: Links: Logisches Backhaulmodell für LTE. Mitte: Physikalische Realisierung durch Multiplex von S1 und X2 Verkehr über eine gemeinsame Anbindung in einem baumförmigen Netz mit einem Aggregationspunkt AGP. Rechts: Durch Zuweisung vorkonfigurierter VLAN Adressen können Kooperationscluster unter mobilen Bedingungen flexibel gebildet und umkonfiguriert werden, der Informationsaustausch zwischen den Zellen belastet das Netzwerk auf diese Weise nur minimal.

Ziel der Arbeiten von HHI-BM und -PN war es zu untersuchen, wie man diese logische Netzarchitektur kosteneffizient auf eine optische Accessnetz-Architektur abbildet und somit Fixed und Wireless Access auf physikalischer Ebene integriert. Dabei müssen als wesentliche Anforderungen hohe Datenraten- und Latenzanforderungen sowie gewisse Synchronisationsanforderungen im Backbone-Netz erfüllt werden.

Im Ergebnis wurde ein Realisierungsvorschlag für die Integration drahtloser und fester Netzzugangstechniken in eine flächendeckende Backbone-Infrastruktur erarbeitet, der den hohen Datenraten- und Latenzanforderungen zukünftiger Mobilfunknetze gerecht wird, siehe Abb.2. Es wurde auch untersucht inwieweit die

gleiche flächendeckende (FTTx) Infrastruktur für Mobilfunk und Festnetz eingesetzt werden kann. Ein weiteres Ziel war es, Realisierungsvorschläge für die Routingfunktion in den Netzknoten zu erarbeiten. Speziell ist in diesem Zusammenhang sollte untersucht werden inwieweit die Leistungsfähigkeit durch eine entsprechende Netzcodierung verbessern kann. Dieser Punkt wurde zwar inhaltlich untersucht und im Konsortium eingehend diskutiert, jedoch wurden die Arbeiten im weiteren Projektverlauf auf die statistisch belastbare Anforderungsanalyse fokussiert.

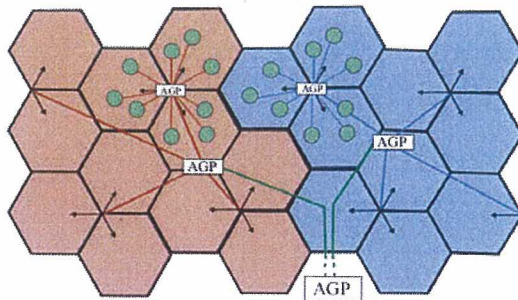


Abb. 2: Realisierungsvorschlag für die Integration drahtloser und drahtgebundener Netzzugangstechnologien für ein heterogenes Mobilfunknetz bestehend aus dreifach sektorisierten Makrozellen und eingebetteten, kleineren Zellen. Der Backhaul-Architekturvorschlag sieht einen hierarchischen Baum mit mehreren Aggregationsstufen vor, wobei sich in jedem Aggregationspunkt ein VLAN-fähiger Switch befindet.

In AP3 wurden für die Realisierung wellenlängen-unabhängiger DWDM-fähiger optischer Transceiver kostengünstige abstimmbare Sendelaser entwickelt (AP3). Dabei wurde ein InP-basierter optischer Verstärkerchip mit einem polymerbasierten thermooptisch abstimmbaren Wellenleiter-Bragg-Gitter hybrid integriert. Hauptziel dieser Neuentwicklung war eine Datenübertragungsrate von 10 Gbit/s bei einer Wellenlängen-Durchstimmung von mindestens 20 nm. In dieses Teilprojekt flossen Vorarbeiten u.a. aus den Projekten POLYPLANAR (BMBF) und MiniWDM (InnoNet, BMWi) ein.

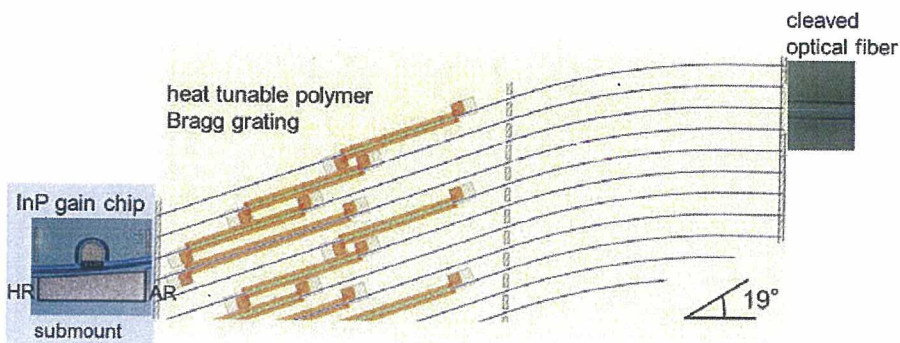


Abb. 3 In CONDOR realisierter, wellenlängenabstimmbarer Laser bestehend aus einem Verstärker und einem thermooptisch abstimmbaren Wellenleiter-Bragg-Gitter.

In AP5 wurden Laserdioden für das Subwellenlängen-multiplexing (OFDM) mit der primären Zielsetzung hinreichender Linearität und hoher Modulationsbandbreite bis zu 25 GHz entwickelt und untersucht.

Mit allen Arbeiten wurde hinsichtlich der beim Projektstart vorgegebenen Ziele wissenschaftliches wie auch technologisches Neuland betreten.

2. Voraussetzungen zur Durchführung des Teilprojekts

2.1 Stand der Wissenschaft und Technik zu Projektbeginn

AP1: Arbeitsschwerpunkt „Netzwerk-Architekturen für optische Zugangsnetze mit Backhaul für „coordinated multi point“ (CoMP) Funknetze“

Ähnlich wie im Festnetz ist auch im Mobilfunk ein stetiger Anstieg der Datenraten zu beobachten. Während die 2. Generation (GSM) auf Sprachdienste fokussiert war, konnte mit UMTS bereits für wenige Nutzer in der Zelle ein akzeptables mobiles Internet angeboten werden. Nach der Erweiterung um HSPA fand das mobile Internet eine immer breitere Anwendung, zunächst im Business- und mittlerweile auch im Privatbereich.

Zum Projektbeginn gab es die ersten Rollouts der 4. Generation, welche mit LTE Release 8 (erst 50, dann 100 Mbit/s pro Zelle) eingeleitet wird. Dabei wurden mit dem 800 MHz Band zunächst das ländliche Gebiet versorgt, anschließend mit den Frequenzen 1.8 und 2.6 GHz auch urbane Gebiete und Indoorversorgung realisiert. Durch LTE wurde das mobile Internet flächendeckend mit höherer Kapazität und geringerer Latenz verfügbar.

Das Wachstum der Datenraten im Mobilfunk ist begrenzt durch das verfügbare Spektrum. Man könnte natürlich die Dichte der Zellen immer weiter erhöhen, jedoch geht das Bestreben der Netzbetreiber eher dahin, komplexere Signalverarbeitung und mehr Antennen pro Standort einzusetzen um die spektrale Effizienz, also die pro Hz Bandbreite pro Zeiteinheit übertragbare Datenmenge zu steigern.

Mit diesem Ziel wurden vielversprechende neue Techniken unter der Bezeichnung „Coordinated Multipoint“ (CoMP) entwickelt. Flächendeckende Mobilfunknetze sind in der Regel begrenzt durch die Interferenz zwischen benachbarten Zellen, hierdurch beträgt die mittlere Summendatenrate pro Zelle in LTE Release 8 z.B. auf einen Bruchteil der maximal möglichen Rate begrenzt. Durch Kooperation zwischen den Basisstationen kann die Interferenz schon vorab (Abwärtsstrecke) bzw. im Nachhinein (Aufwärtsstrecke) reduziert werden. Auf diese Weise ist im Idealfall eine interferenzfreie, d.h. nur noch durch Rauschen begrenzte Übertragung im Mobilfunk möglich. Dieselben Radioressourcen können in benachbarten Zellen störungsfrei wiederverwendet werden und die erwähnte Spitzendatenrate kann nun auch im Mittel in einer Zelle erreicht werden.

In LTE Release 11 wurden erste CoMP Techniken mittlerweile standardisiert, jedoch waren sie noch begrenzt auf die Kooperation zwischen den Sektoren an einem Standort. Der Hauptgrund dafür war das Backhaul: Der für die Kooperation notwendige Informationsaustausch zwischen benachbarten Basisstationen kann lokal abgewickelt werden und ist auch die Synchronisation der Basisstationen ist am selben Ort unproblematisch. Jedoch zeigten die Untersuchungen in CONDOR dass damit nur 1/3 der Fälle wo CoMP wünschenswert wäre, abgedeckt werden können. Dadurch ist die Wirksamkeit dieser Techniken deutlich eingeschränkt.

Allerdings wäre dazu ein intensiver Datenaustausch zwischen den benachbarten Standorten nötig. Über dieses Netz werden Daten mit hoher Rate ausgetauscht.

Während in der Abwärtsstrecke Datensignale und Kanalinformationen zwischen den Basisstationen ausgetauscht werden, betrifft es in der Aufwärtsstrecke die Abtastwerte der empfangenen Signale, welche wesentlich höhere Datenraten generieren. Außerdem müssen die Kanalinformationen in der Kohärenzzeit des Kanals ausgetauscht werden, um z.B. eine zum Übertragungskanal passende Vorentzerrung möglich zu machen. Insgesamt resultieren aus der Einführung von Inter-site CoMP erhebliche Datenraten- und Latenzanforderungen, deren Statistiken vor Projektbeginn nicht bekannt waren.

Zu Projektbeginn war nur diffus klar dass das Mobilfunk-Backhaul schon für LTE Release 8 erweitert werden muss, in einigen Gebieten könnte das Ausrollen von LTE durch das noch fehlende Backhaul sogar verzögert werden. Release 10 würde die Anforderungen weiter erhöhen. Sinnvoll wäre daher, von Beginn an Glasfasern zu jedem LTE Standort zu verlegen. Es war auch klar dass die Anforderungen langfristig nicht mehr durch vorhandene Ersatztechniken wie Richtfunk oder Freistrahloptik abgedeckt werden können, auch dort muss eine Entwicklung stattfinden die jedoch nicht im Fokus von CONDOR lag.

Gleichzeitig mit dem Ausrollen von LTE wurden in Deutschland Fiber-to-the-curb, Fiber-to-the-premise, Fiber-to-the-building, Fiber-to-the-home (FTTx) Netze geplant und realisiert. Es war naheliegend, eine mögliche Koordination beider Rollouts zu untersuchen, um die Infrastrukturkosten zu minimieren. Dabei stellte sich die Frage, wie eine optimale Abbildung der spezifischen Backhulanforderungen aus dem Mobilfunk auf die Systemarchitektur von FTTx aussehen würde.

Im Projekt CONDOR sollten deshalb exemplarisch die verschiedenen möglichen und damals wie heute noch nicht endgültig standardisierte algorithmische Ansätze für CoMP hinsichtlich der Realisierbarkeit ihrer spezifischen Backhulanforderungen auf FTTx Netzwerkarchitekturen untersucht werden. Die Erkenntnisse versprachen auch entscheidende Rückschlüsse auf die Standardisierung der Algorithmen in LTE.

Leider machte 3GPP einen langsameren Fortschritt als zu Projektbeginn erwartet. Die mit den vereinbarten Simulationsannahmen durchgeführten Studien lieferten weit streuende Ergebnisse. Letztere führten zu Zweifel an der CoMP Technik, die in Release 10 noch als „unreif“ (immature) eingeschätzt wurde im Vergleich zu anderen Techniken, wie Carrier Aggregation und Advanced MIMO und daher zunächst zurückgestellt wurde. Jedoch wurde das Potential von CoMP weiterhin als hoch eingeschätzt, im Hinblick auf die 5. Mobilfunkgeneration. Einige Arbeiten im Projekt waren daher auch den Themen Impairments und Kompensation sowie der generellen Reduktion des Overheads gewidmet, um die Diskussion mit neuen Erkenntnissen und Fakten voranzubringen. Hierfür konnten in CONDOR auch erste Ergebnisse aus dem parallel zu diesen Schwerpunkten an der TU Berlin gestarteten DFG Vorhaben CoMPmobil genutzt werden

Arbeitsschwerpunkt DWDM-Quellen AP3:

In zukünftigen WDM-Passiven-Optischen-Netzen (PONs) haben optische Transceiver mit einstellbarer Wellenlänge (sog. „farblose“ Transceiver) aus finanziellen und logistischen Gründen einen großen Stellenwert. Marktfähige Lösungen existieren bislang noch nicht. Eine wesentliche Herausforderung ist die Realisierung eines einfachen und damit kostengünstigen wellenlängenabstimmbaren Lasers. Für Long-haul- und Metro-Netze existierten hierfür bereits Lösungen, welche jedoch als Massenprodukt für den Teilnehmerbereich noch zu teuer sind. Die angesprochenen Lösungen bestanden fast ausschließlich aus monolithisch

integrierten InP-basierten Mehrsektionslasern. Mit solchen Mehrsektionslasern ließen sich durch parallele Zusammenschaltung mehrerer unterschiedlicher DBR-Gitter kombinierte Durchstimmbereiche >40nm erreichen [1]. Solche Mehrsektionslaser waren jedoch technologisch sehr aufwändig und damit teuer. Bauformbedingt erlaubten sie auch keine hochfrequente Direktmodulation. Für den Teilnehmerbereich waren sie daher nicht geeignet. Die koreanische Firma ChemOptics (www.chemoptics.com) hatte auf der OFC'09 einen farblosen Transceiver mit thermo-optisch abstimmbaren „external cavity“-Sendelasern vorgestellt. Dieser war aus Einzelkomponenten aufgebaut und maximal bis 2.5Gbit/s modulierbar. Der im Projekt realisierte DBR-Laser basiert auf diesem Konzept.

[1] H. Debrégeas-Sillard et. al., "More than 40nm tuning DBR-MMI-SOA with only one Bragg current control, compatible with fast switching", ECOC 2007 Berlin, paper 9.2.4

Arbeitsschwerpunkt OFDM-Technologien AP5:

Optische Komponenten für analoge Datenübertragung werden heute überwiegend für CATV- und Radio-over-Fiber-Anwendungen verwendet, wobei die Bandbreiten auf etwa 2,5GHz begrenzt sind. Die extrem hohen Anforderungen an Linearität und Signal/Rauschverhältnis schlagen sich bei den Bauteilkosten nieder, so dass im Rahmen des Projektes neue Ansätze hierfür untersucht wurden. Im Focus der Entwicklung stand insbesondere die Erhöhung der Modulationsbandbreite auf bis zu 25GHz, um den Anforderungen heutiger Datennetze gerecht zu werden. Direkt modulierbare 40Gbit/s Einsektionslaser (-3dB Modulationsbandbreite um 30GHz) waren zu Projektstart nur von einer Gruppe veröffentlicht [1] und sind derzeit noch immer nicht kommerziell verfügbar. An Mehrsektionslasern wurde eine 40Gb/s Direktmodulation schon von mehreren Gruppen nachgewiesen, z.B. EML-Strukturen [2] und PFL-Strukturen [3]. In beiden Fällen beträgt die zugehörige -3dB Modulationsbandbreite 30...40GHz. Untersuchungen zur Linearität der genannten Laser-Strukturen und/oder deren Eignung für die im Projekt genutzte Subträgerbandtechnik (OFDM) lagen zum Projektstart nicht vor.

[1] K. Nakahara et. al., "High Extinction Ratio Operation at 40-Gb/s Direct Modulation in 1.3- μ m InGaAlAs-MQW RWG DFB Lasers", OFC 2006 Anaheim, USA, paper OWC5

[2] T. Saito et. al., "Clear eye opening 1.3 μ m-25 / 43Gbps EML with novel tensile-strained asymmetric QW absorption layer", ECOC 2009, Vienna, paper 8.1.3

[3] U. Troppenz et. al., "1.3 μ m Passive Feedback Laser for 28Gb/s and 40Gb/s Transmission over Uncompensated SSMF links", ECOC 2009, Vienna, paper 8.1.4

2.2 Eigene Vorarbeiten vor Projektbeginn

AP1 Arbeitsschwerpunkt Netzwerk-Architekturen für optische Zugangsnetze mit Backhaul für „coordinated multi point“ (CoMP) Funknetze

Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Abteilung „Photonische Netze und Systeme“ (HHI-PN) konzentrieren sich auf die Transportebene des zukünftigen Breitband-Internets. Hierbei werden optische Netze vom Core- über den Access- bis hin zum In-Haus-Bereich betrachtet. Das HHI hat in einer Anzahl internationaler und nationaler Projekte, in denen optische Access-Netze erforscht und entwickelt wurden, erfolgreich mitgearbeitet. In dem Verbundprojekt MaiNet („Multimedia Access und Indoor-Netze“), des BMBF führte das HHI zusammen mit Alcatel und T-Systems systemtheoretische Arbeiten und Machbarkeitsuntersuchungen zu Netzarchitekturen für den Zugangs- und Inhouse-Bereich durch. Das HHI hat in dem EU-Verbundvorhaben MUSE Machbarkeitsuntersuchungen über die Verwendung einer

CWDM-Ringarchitektur für den Zugangsbereich durchgeführt. Im Projekt Berlin-Access hat das HHI an einem statistischen Systemdesign für optische Access-Netze gearbeitet und Modelle und Komponenten experimentell validiert. Derzeit wird das BMBF Projekt FTTx-PLAN bearbeitet, in dem HHI-PN zusammen mit zwei KMUs und dem Zuse-Institut Berlin an der Entwicklung von Planungswerkzeugen für FTTx-Netze arbeitet. Die Ergebnisse des Projektes können direkt in dieses Vorhaben einfließen.

Die F&E Aktivitäten der Abteilung HHI-WN umfassen seit 2001 die Entwicklung moderner Mobilfunksysteme. Im direkten Vorfeld des Projektes CONDOR lagen vielfältige Arbeiten zu multiple-input multiple-output (MIMO) Systemen vor. Das HHI hatte umfangreiche Beiträge zur Theorie, technischen Machbarkeit und Integration in zukünftige Standards geleistet. Herausragend waren weltweit erstmalige Demonstrationen: die erste hochbitratige MIMO Übertragung mit einer spektralen Effizienz von > 20 bit/s/Hz, d.h. von mehr als 100 Mbit/s in nur 5 MHz Bandbreite (2004), die erste 1 Gbit/s MIMO-OFDM Übertragung auf der 3GSM World in Cannes (2005), die erste 3GPP-LTE Live-Übertragung auf der ITU Telecom World in Hong Kong (2006), die erste breitbandige Mehrnutzerdetektion im Uplink (virtual MIMO, 2007), der Nachweis dass man den MIMO Durchsatz auch im Multizellbetrieb linear mit der Antennenzahl skalieren kann (2007), die erste Demonstration der neuen adaptiven Mehrnutzer MIMO-MAC Schicht auf der 3GSM in Barcelona (2007), und die ersten LTE Feldversuche in Berlin (2008). In den BMBF-Projekten 3GeT und ScaleNet wurde das verteilte kooperative Übertragungskonzept entworfen, wodurch die Zellen im Idealfall interferenzfrei gestellt werden können. Im BMBF-Projekt EASY-C wurde der erstmals der Nachweis der Machbarkeit in einem Feldversuch erbracht (2009). Ziel der Arbeiten im Projekt CONDOR war die Integration mit dem optischen Backbone, womit ein flächendeckendes mobiles Zugangsnetz mit höchster Kapazität für den schnellen Internetzugang zu jeder Zeit und an jedem Ort realisierbar wird.

[1] V. Jungnickel, M. Schellmann, L. Thiele, T. Wirth, T. Haustein, O. Koch, W. Zirwas, E. Schulz, Interference Aware Scheduling in the Multiuser MIMO-OFDM Downlink, IEEE Communications Magazine, Vol. 47, No. 6, June 2009.

AP3 Arbeitsschwerpunkt „DWDM-Quellen und Komponenten für OFDM-Systeme“ *DWDM-Quellen:*

Am HHI wurden vor dem Projektstart bereits Gain-Chips für Industriekunden entwickelt und hergestellt. Diese Version der Gain-Chips wurden beim Kunden in External-Cavity (EC)-Laser Konfigurationen für den cw-Betrieb genutzt, d.h. eine Direktmodulation war mit diesen nicht möglich. Arbeiten zur Optimierung der Gain-Chips hinsichtlich einer 10Gb/s Modulation in EC-Konfiguration, wie sie im Teilprojekt vorgesehen war, wurden vor dem Projektstart nicht durchgeführt. Neben der InP-basierten Technologie werden am HHI seit vielen Jahren auch optische Komponenten auf der Grundlage von Polymermaterialien entwickelt. Die Forschungsarbeiten vor dem CONDOR-Projekt befassten sich u.a. mit der Realisierbarkeit optischer FTTH-Transceiver auf der Basis von Polymerboards, die im Rahmen eines vom Land Berlin geförderten Vorhabens (Berlin-Access) durchgeführt wurden [1]. Hier wurden Machbarkeitsuntersuchungen zu einer InP/Polymer-Hybridtechnologie exemplarisch am Beispiel eines Transceiver-Chips (mit Richtkoppler als λ -Filter) durchgeführt. Spezielles Augenmerk lag auf der Ankopplung von Lasern an Polymerwellenleiter. Dabei wurden gute Ergebnisse mit stimflächengekoppelten Lasern erzielt. Im CONDOR-Projekt wurde diese Methode bei den entwickelten durchstimmbaren EC-Lasern eingesetzt und hinsichtlich

fertigungstechnischer Gesichtspunkte weiter optimiert. Konkrete Voruntersuchungen zu hybrid integrierten durchstimmbaren EC-Lasern, insbesondere zu thermo-optisch verstimmbaren Bragg-Reflektionsgittern, wie sie im CONDOR-Projekt entwickelt wurden, wurden vor diesem Projekt am HHI nicht durchgeführt.

[1] N. Keil, et al. "Optical coupling of active components and polymer based optical waveguide boards", ECOC 2007, Conf. Dig. Vol.3, pp. 165-166 (2007)

AP5 Komponenten für OFDM

Am HHI wurden vor dem CONDOR-Projekt bereits seit vielen Jahren direkt modulierbare Laser entwickelt und hergestellt. Die neuesten Entwicklungen auf diesem Gebiet waren ungekühlte 10Gb/s-DFB-Laser und 40Gb/s Passiv-Feedback-Laser (PFL), die teils in direktem Industriesauftrag und teils in öffentlich geförderten Vorhaben entwickelt wurden. In allen Fällen handelt es sich jedoch um Laser-Dioden für Direktmodulation in Form einer reinen Amplitudenmodulation. Entsprechende Entwicklungen und Untersuchungen zur Frequenzmodulation dieser Komponenten sowie der im Teilprojekt verlangten hohen Linearität wurden vor dem Projekt nicht durchgeführt.

2.3 Bestehende Schutzrechte (eigene und Dritter)

Für das Gesamt-Vorhaben siehe Verbund-Beschreibung.

Das Heinrich-Hertz-Institut hat einige vorhabensrelevante Patente im Bereich der Mobilfunkübertragung angemeldet, meist in Zusammenarbeit mit Industriepartnern. Ebenso bestehen diverse technologische Patente mit potentieller Bedeutung für das Projekt. Das HHI hat vertragsgemäß das Recht, die Ergebnisse für wissenschaftliche Projekte weiter zu nutzen. Außerdem existieren folgende Patente und Gebrauchsmuster bezüglich optischer Komponenten:

Patente:

- M. Möhrle, A. Sigmund, F. Reier, „Verfahren zur Herstellung eines Halbleiterlasers mit einer aluminiumhaltigen Aktivschicht und mit dem Verfahren hergestellter Halbleiterlaser mit Rippenwellenleiter“; DE 10 2004 010 260 B4

- M. Möhrle, "BH-Laser mit getapertem optischen Wellenleiter, insbesondere BH-DFB-Laser", EP1677396B1

Gebrauchsmuster:

-M. Möhrle et. al., "Monolithisch integrierte BH-Laserstruktur als Verstärkerelement mit integrierter Taperung der aktiven Laserschicht", DE 20 2005 015 673 U1

3. Planung und Ablauf des Teilprojekts

3.1 Arbeitspakete

3.1.1 AP1: Netzwerk-Architektur

T1.2: Optische Netzarchitektur und Technologiespezifikationen

Die in T1.1 erarbeiteten Ziele wurden in diesem Arbeitspaket in konkrete Netz-Entwürfe umgesetzt. Dabei stand die Netz-Architektur in enger Wechselwirkung mit den in anderen APs zu erarbeitenden Komponenten-Technologien. Zu Beginn des Projekts wurden verschiedene Netzarchitekturen entworfen und im Konsortium diskutiert. In Absprache mit den Projektpartnern hat sich das HHI dann mit der in Abb.2 gezeigten Architektur vertieft auseinandergesetzt. Sie stellt eine baumförmige Architektur dar, bei der in jedem Knoten ein aktiver Ethernet Switch sitzt. In das

Szenario wurden in der zweiten Projekthälfte zusätzlich sog. kleine Zellen aufgenommen. Als erstes Modell wurde angenommen dass deren Verkehrslast direkt an der übergeordneten Makrozelle aggregiert wird, um so die pro Fläche anfallenden Verkehrslasten für die Datenversorgung (S1) und die Kommunikation zwischen den Zellen (X2) quantitativ bestimmen zu können. Natürlich kann der praktische Netzausbau auch etwas anderes realisiert werden. Alle Meilensteine wurden erreicht.

M121 (Q2): Erste Festlegung der Anforderungen und Spezifikationen

M122 (Q6) Auswahl der Accessnetz-Architekturszenarien, Aktualisierung M121

M121 (Q2): Erste Festlegung der Anforderungen und Spezifikationen

M122 (Q6) Auswahl der Accessnetz-Architekturszenarien, Aktualisierung M121

T1.4: Backhauling-Architekturen für CoMP

Es sollte zunächst basierend auf den Ergebnissen aus dem Arbeitspunkt T1.2 abgeschätzt werden, inwieweit z.B. PON-Strukturen, bei denen die logische Vermaschung der Basisstationen physikalisch über die OLT/aGW erfolgt, den gestellten Anforderungen einer zukünftigen kooperativen Übertragung im Mobilfunk genügen. Zum anderen wurde untersucht, unter welchen Umständen und in welchen Fällen die X2 Schnittstelle als physikalische Verbindung zwischen den Basisstationen realisiert werden muss. Für ausgewählte physikalische Netzarchitekturen wurden Leistungsparameter quantitativ durch Simulation ermittelt. Diese Parameter sind Latenz, erzielbarer Durchsatz, Skalierbarkeit, Ausfallsicherheit und Robustheit gegenüber verschiedenen Störungen. Hierfür wurden sowohl auf der optischen als auch auf der Funknetzebene Simulationen durchgeführt. Die Leistungsparameter hingen auch davon ab, dass ggf. notwendige neue Netzelemente optimal platziert sind. In Bezug hierauf wurden entsprechende Optimierungen durchgeführt.

Im Projektverlauf entstand aufgrund einer Umstrukturierung in der Abteilung WN ein Engpass beim ursprünglich geplanten Einsatz des Systemlevel-Simulators, welcher in den Vorgängerprojekten ScaleNet und EASY-C zu einem hohen Stand entwickelt worden war. Aus diesem Grund musste eine andere Möglichkeit gefunden werden, die im Projekt von den anderen Partnern benötigten quantitativen Ergebnisse bereitzustellen. Dieses Problem wurde in zwei Schritten gelöst. Zum einen wurden vereinfachte Methoden zur Berechnung der Backhaulast entwickelt, die Vereinfachung beruht auf der Einführung des sog. intersite-ratios, also des Bruchteils des gesamten aus JT-CoMP entstehenden, standortübergreifenden Verkehrs. Weiterhin wurden gemessene Kanaldaten mit eingebetteten kleinen Zellen als Ersatz für das Kanalmodell verwendet. Die Algorithmik wurde im Vergleich zu EASY-C signifikant verbessert, insbesondere wurden CoMP-Cluster mit flexibler Größe eingesetzt, je nach Interferenzszenario, und es wurde eine neue sukzessive Nutzerauswahl eingeführt, welche zu drastisch verringertem Feedback und zu signifikant erhöhten Gewinnen führte. Die bestimmte Backhaul-Verkehrsstatistik basiert auf diesen Algorithmen, sowie auf den Empfehlungen des NGMN Forums, das von den großen Netzbetreibern geführt wird.

Die Latenzanforderungen ergeben sich in erster Linie aus den Verzögerungszeiten auf der Luftschnittstelle und im Backhaul. Hierfür wurden praxisnahe Annahmen gemacht. Die Hauptarbeit in diesem Teil des APs bestand darin, die Auswirkungen der Verzögerungen auf die CoMP Performance zu quantifizieren. Hierfür wurde ein

Dreischritt-verfahren eingeführt. Zunächst wurde der Kanalfehler(MSE) bestimmt, und im zweiten Schritt die entsprechende Störung (SINR). Hierbei zeigte eine Analyse basierend auf der Theorie der Zufallsmatrizen dass die Zahl der Basisstations- und Mobilfunkantennen im Cluster eine ganz entscheidende Rolle spielt. Auf diese Weise konnte der Durchsatzverlust als Funktion der Zeit erstmals analytisch abgeschätzt, und auf diese Weise die erforderliche Latenz abgeschätzt werden. Es zeigte sich, dass in erster Linie die existierende Rahmenstruktur in der Luftschnittstelle, und weitaus weniger das Backhaul, hier die physikalischen Grenzen bestimmen. Ein zum Projektende unabhängig von der DTAG gemeinsam mit NSN veröffentlichte Arbeit zeigt, dass es auch logische Grenzen für die Latenz gibt, die sich aus der Sicherheitsarchitektur von LTE ergeben. Eine Systemstudie zeigte daß noch viele grundlegende Arbeiten zur Sicherheitsarchitektur im Mobilfunknetzwerk gemacht werden müssten, um diesen Flaschenhals aufzuweiten. Aus diesem Grunde wurde aus dem Condor Konsortium heraus (HHI, ALU), ergänzt um weitere Partner, ein Vorschlag für ein Nachfolgeprojekt beim BMBF eingereicht, das sich mit der Sicherheitsarchitektur kritischer offener Infrastrukturen beschäftigen soll, als Grundvoraussetzung für die Reduzierung der Latenz im Mobilfunk wie auch in Festnetzanwendungen, wie z.B. im Internet der Dinge.

Der notwendige Hardwareaufwand für die Einbindung des Backhails für CoMP in die optische Zugangsnetzinfrastruktur wurde abgeschätzt und die erreichbaren Leistungsparameter wurden ermittelt.

Mit mehreren Partnern, insbes. ALU und KIT wurden die Ergebnisse regelmäßig auf Projektmeetings und in Telefonkonferenzen detailliert diskutiert. Aus dem engen Austausch zwischen Optik und Mobilfunk resultierten Spezifikationen für die Technologien in den übrigen APs, sowie Schlussfolgerungen für die Architektur.

Parallel zu den Projektarbeiten liefen die Standardisierung für CoMP in 3GPP LTE Release 10. Die oben genannten Erkenntnisse flossen in erster Linie über Publikationen in den Standardisierungsprozess ein. Da die backhaulrelevante Standardisierung von CoMP verzögert ist kann erst zu einem späteren Zeitpunkt ein Gesamtvorschlag für die Architektur des integrierten Access-Netzes abgeleitet werden, der sowohl die Festnetzbreitbandanschluss als auch die flächendeckende LTE/SAE Advanced Mobilfunknetz enthält. Die Untersuchungen laufen in Nachfolgeprojekten weiter, z.B. im EU Projekt SODALES am HHI. Alle Meilensteine konnten planmäßig erreicht werden.

M141 (Q8) Simulationsumgebung verfügbar, erste Ergebnisse

M142 (Q10) Abschließende Performanceanalyse

M143 (Q12) Realisierungskonzept

3.1.2 AP3: DWDM-Laser

Task3.1: Gain-Chips und abstimmbare Polymergitter für Wellenlängenabstimmbare 10Gb/s fähige Laserdioden

Die im Teil-Projekt geplante Realisierung eines Low-Cost tunable Single-Mode-Laser, der Schlüsselkomponente für optische (D)WDM-basierende Access-Netze, wurde als Hybrid-Integration eines Halbleiter-Gain-Chips mit einem polymerwellenleiter-basierten Reflexionsgitter realisiert. Die Projektziele umfassten 10Gb/s Direktmodulation und einen spektralen Durchstimmbereich von 20 nm, was erstmals erfolgreich hergestellt und gemessen wurde.

Hierfür waren im Rahmen des Teil-Projekts die nachfolgend beschriebenen Entwicklungsarbeiten geplant.

Zunächst sollten Gain-Chips mit hoher differentieller Verstärkung entwickelt werden, welche auch in ECL-Konfiguration noch eine 10Gb/s-Modulation erlauben. Angestrebt wurde eine Modulations-bandbreite als Einzellaser von ca. 15GHz. Ggfs. sollten für die aktive Schicht anstelle der konventionellen InGaAsP/InGaAsP-MQW-Strukturen auch InGaAlAs/InGaAlAs-MQW-Strukturen eingesetzt werden, die sich speziell durch größere Modulationsbandbreiten bei gleichzeitig größeren Betriebstemperaturen auszeichnen. Darüber hinaus mussten diese Gain-Chips vorderseitig einen integrierten Modenkoverter (Taper) aufweisen, um eine effiziente Lichteinkopplung in den Polymerwellenleiter zu ermöglichen.

Die geplanten Arbeiten umfassten hierbei Simulationsrechnungen, CAD neuer Lithographie-Maskensätze, die Herstellung der benötigten Basiswafer mittels MOVPE, die vollständige Prozessierung der Wafer und Charakterisierung der Gain-Chips.

Parallel hierzu war die Entwicklung von index-gekoppelten Bragg-Gittern auf Polymer-Basis geplant, welche die effiziente Modenselektion in ECL-Konfiguration ermöglichen. Erstmals sollten hierbei die Polymergitter mit einem Heizdraht versehen werden, mit dessen Hilfe die spektrale Durchstimmung durch thermo-optische Änderung des Brechungsindex realisiert wurde.

M311 (Q3) Festlegung des Designs der 10Gb/s Polymergitter-basierten EC-Laser mit gleichzeitig großem Durchstimmbereich

Task3.2: Hybrid-integrierter 10Gb/s, λ -abstimmbarer Laser

Ziel des Arbeitspunktes T3.2 war es, einen EC-Laser mit einem möglichst kurzen effektiven Laserresonator zu entwickeln, um trotz der im Vergleich zu konventionellen Einsektions-DFB-Lasern (mit Baulängen zwischen 200 und 400 μ m) erhöhten Photonenlebensdauer in ECL-Konfiguration noch eine 10Gb/s Direktmodulation zu ermöglichen. Basierend auf durchgeführten Vorarbeiten zu den Einzelkomponenten sollte erstmalig ein hybrid integrierter EC-Laser hergestellt und untersucht werden. Hierbei sollten unterschiedliche Gain-Chips sowie Polymer-Gitter kombiniert und hinsichtlich Einmodigkeitsausbeute, Laserperformance, Modulations- und Durchstimmverhalten charakterisiert werden. Darüber hinaus war hier auch die Untersuchung der Notwendigkeit einer Phasensteuerung für das Erreichen einer Einmodigkeit Entwicklungsziel. In mehreren Iterationen sollten anschließend die hybriden EC-Laser hinsichtlich Modulations-bandbreite und Durchstimmbereich optimiert werden.

M321 (Q6) erste EC-Laser Generation

M322 (Q11) optimierter 10Gb/s EC-Laser mit 20nm Durchstimmbereich

3.1.3 AP5: OFDM-Technologien

T5.2: Entwicklung linearer Laser-Dioden für Subträgerbandtechnik

Phase 1 Aufbau und Charakterisierung vorhandener Sendelaser- und Fotodioden-Chips

Für die optische Übertragung unter Anwendung der Subträgerbandtechnik sollten direkt modulierbare Sende-Chips mit flachem Frequenzgangverlauf und großer

Modulationsbandbreite entwickelt werden, die eine verzerrungsfreie Frequenzmodulation ermöglichen, d.h. insbesondere kleine Werte für die charakteristischen Größen *Harmonic-* und *Intermodulation Distortion* aufweisen. Hinsichtlich der optimalen Laser-Bauform für Frequenzmodulation waren zu Projektbeginn jedoch noch Fragen offen. Daher war geplant, in der ersten Projektphase anhand von am HHI hergestellten unterschiedlichen direktmodulierbaren DFB- und PFL-Chips die Eigenschaften dieser Komponenten bei Frequenzmodulation zu untersuchen. Entsprechende Linearitätsuntersuchungen sollten vom Projektpartner UKA-IPQ durchgeführt werden. Das HHI hat hierfür entsprechende Laser-Chips zur Verfügung gestellt.

Eine zu Projektbeginn für die anvisierte Modulationstechnik aussichtsreiche Laser-Bauform waren kurze Einsektions-DFB-Laser, welche aufgrund ihrer geringen Länge Modulationsbandbreiten $>20\text{GHz}$ aufweisen können.

Solche Laser wurden vor Durchführung des CONDOR-Projektes am HHI nicht entwickelt und hergestellt. Es war daher geplant, basierend auf Arbeiten, die am HHI in anderen Projekten durchgeführt wurden, in Phase 1 solche kurzen DFB-Laser herzustellen und dann zusätzlich zu den oben genannten Komponenten der UKA zur Untersuchung der Linearitätseigenschaften zur Verfügung zu stellen. Basierend auf diesen Untersuchungsergebnissen sollte anschließend eine optimale Laser-Bauform für die anvisierte Frequenzmodulation festgelegt und die Spezifikationen hierfür definiert werden.

Phase 2 Entwicklung einer linearen Laser- und einer linearen Fotodiode mit Bandbreiten bis 40GHz

Basierend auf den in Phase 1 erhaltenen Ergebnissen sollten hinsichtlich der geforderten Linearität optimierte neue Laser-Dioden-Bauformen entwickelt werden. In mehreren Iterationen sollten diese dann am HHI hergestellt und optimiert werden.

Die folgenden Arbeiten waren geplant: Simulationsrechnungen, CAD eines neuen Lithographie-Maskensatzes, Einfahren und Herstellung der benötigten Basiswafer mittels MOVPE, die Prozessierung der Wafer und Charakterisierung der Laser-Dioden. Entsprechende neue Laser-Dioden sollen dann an die UKA-IPQ zur Charakterisierung der Linearitätseigenschaften abgegeben werden.

M521 (Q2) Bewertung und Entscheidung für eine Laser- und Fotodiodenvariante in Zusammenarbeit mit UKA-IPQ

M522 (Q6) erste Generation der festgelegten Laser- und Fotodioden-Bauform

M523 (Q11) optimierte Laser- und Fotodioden-Bauform für hochbitratige Subträgerband-Modulation

Übersicht Meilensteine für das Teilprojekt

	Beschreibung	Plan	erfüllt?
M121	Erste Festlegung der Anforderungen und Spezifikationen	Q2	✓
M122	Auswahl der Architekturszenarien, Aktualisierung M121	Q6	✓
M141	Simulationsumgebung verfügbar, erste Ergebnisse	Q8	✓
M142	Abschließende Performanceanalyse	Q10	✓
M143	Realisierungskonzept	Q12	✓
M311	Festlegung des Designs der 10Gb/s polymergitterbasierten EC-Laser mit großem Durchstimmbereich	Q3	✓
M321	erste EC-Laser Generation	Q6	✓
M322	optimierter 10Gb/s EC-Laser mit 20nm Durchstimmbereich	Q11	✓
M521	Bewertung und Entscheidung für eine Laservariante in Zusammenarbeit mit UKA-IPQ	Q2	✓
M522	erste Generation der festgelegten Laser-Bauform	Q6	✓
M523	optimierte Laser-Bauform für hochbitratige Subträgerband-Modulation	Q11	✓

3.2 Verwendete Fachliteratur und Informationsdienste

AP3 & AP5:

[1] Buus, J., M.-C. Amann und D. J. Blumenthal: Tunable Laser Diodes and Related Optical Sources (Second Edition), John Wiley and Sons, Inc., 2005

[2] Coldren, L. A. und S. W. Corzine: Diode Lasers and Photonic Integrated Circuits. John Wiley & Sons, Inc., 1995

[3] Kapon, ELI: SEMICONDUCTOR LASERS II Materials and Structures. Academic Press, 1998.

[4] <http://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>

[5] <http://journals.aip.org/>

[6] <http://www.sciencedirect.com/>

4. Arbeitsteilung / Zusammenarbeit mit Dritten

4.1 Netzplan der Zusammenarbeit mit Partnern des Verbundes

Die Teilvorhaben des Verbundes waren untereinander vernetzt entsprechend der Verbund-Beschreibung. Die Arbeiten dieses Teilprojekts hatten die unten gezeigten Verbindungen und Abhängigkeiten von den Arbeitspaketen der Partner.

Übergabepunkte und Meilensteine zu den Arbeitspaketen

Quartal	Q1			Q2			Q3			Q4			Q5			Q6		
Projekt-Monat	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Projekt Meilenst.						M1												M2
Eigene Meilenst.					M121 M521			M311										M122 M321 M522
AP1, T1.2																		
AP1, T1.4																		
AP3, T3.1																		
AP3, T3.2																		
AP5, T5.2																		
AP5, T5.4		↓																↓
AP8, T8.2																		↓
AP9, T9.1																		↓

Quartal	Q7			Q8			Q9			Q10			Q11			Q12		
Projekt-Monat	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Projekt Meilenst.						M3												M4
Eigene Meilenst.					M141						M142			M322 M523				M143
AP1, T1.2																		
AP1, T1.4																		
AP3, T3.1																		
AP3, T3.2																		
AP5, T5.2																		
AP5, T5.4																		
AP6						↓						↓						
AP7																		
AP8, T8.1						↓						↓						

4.2 Zusammenarbeit mit Dritten außerhalb des Verbundes

Eine Zusammenarbeit mit Dritten war in diesem Teilvorhaben nicht vorgesehen.

5. Erzielte Ergebnisse

AP 1: Netzwerkarchitektur

In AP1 wurden Backhaul-Netzwerke für LTE-Advanced Mobilfunknetze entworfen und umfassend bewertet. Zunächst wurden die adaptiven Algorithmen für verteilte, kooperierende Basisstationen auf PHY und MAC Schicht wesentlich weiterentwickelt. Flexible Cluster können je nach der individuellen Interferenzsituation an einem Bezugsterminal sehr effizient gebildet werden, indem Terminals aus den anderen Zellen im Cluster selektiv hinzugenommen werden, so dass sie ebenfalls einen Gewinn aus der Kooperation erzielen. Aus dieser Kernidee wurde ein echtzeitfähiges Protokoll für kooperierende Basisstationen entwickelt, mit dem erstmals eine theoretische Schranke erreicht wurde, bei der die spektrale Effizienz nur noch durch die Interferenz von Zellen außerhalb des Clusters begrenzt wird [1]. Um Cluster flexibel bilden zu können, wurde auf ein VLAN-Konzept zurückgegriffen, das auf Ethernet-Switches an jeder Makrobasisstation sowie an höheren Aggregationspunkten basiert [2]. Das Gesamtkonzept eines integrierten Mobilfunknetzes mit verteilten, kooperierenden Basisstationen zeigt Abb. 4.

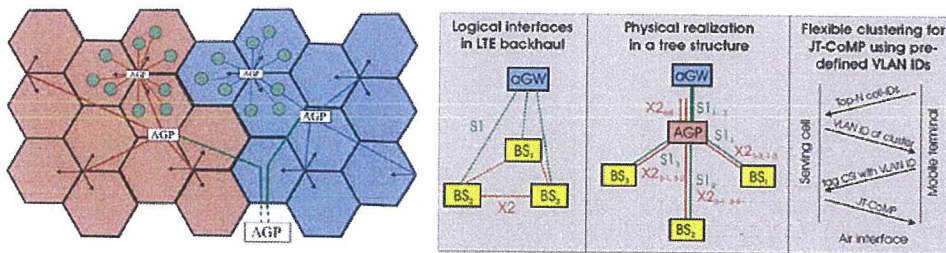


Abb. 4: Links: Modell eines heterogenen Mobilfunknetzes bestehend aus dreifach sektorisierten Makrozellen und eingebetteten, kleineren Zellen. Das Backhaul-Architekturvorschlag sieht einen hierarchischen Baum mit mehreren Aggregationsstufen vor, wobei sich in jedem Aggregationspunkt ein VLAN-fähiger Switch befindet. Daneben Links: Logisches Backhaulmodell für LTE und LTE-Advanced. Mitte: Physikalische Realisierung durch Multiplex von S1 und X2 Verkehr über eine gemeinsame Anbindung in einem baumförmigen Netz mit einem Aggregationspunkt AGP. Rechts: Durch Zuweisung vorkonfigurierter VLAN Adressen können Kooperationscluster unter mobilen Bedingungen sehr schnell und flexibel gebildet und umkonfiguriert werden, der Informationsaustausch zwischen den Zellen belastet das Netzwerk auf diese Weise minimal.

Multizell-Simulationen in gemessenen Outdoor-Szenarien ermöglichten statistisch fundierte Aussagen zur Leistungsfähigkeit heterogener LTE-Advanced Netze, in denen optimierte Algorithmen eingesetzt werden. Insgesamt steigt die Datenrate multiplikativ mit den Technologieparametern (Zahl der Antennen, aggregierte Bandbreite, CoMP) und linear mit der Zahl der kleinen Zellen pro Makrozelle. Ausgehend von einer 2x2 MIMO LTE-Basiskonfiguration mit 20 MHz Bandbreite, kann die pro Makro-Basisstation bereitgestellte Kapazität mit allen in LTE-A verfügbaren Methoden (50 MHz, 8x8 MIMO, CoMP, 10 kleine Zellen pro Makrozelle, JT-CoMP) zusammengenommen etwa noch um den Faktor 300 gesteigert werden. Im Backhaul wird dazu eine etwa 1000-fach höhere Bandbreite benötigt, maximal 100 Gbit/s pro Makro-Basisstation (Abb.5, links). Mit dem Endausbau von LTE-A wird ein Hardwareaufwand im Access-Bereich erforderlich, der mit heutigen Anforderungen auf einer Wellenlänge im Transportnetz vergleichbar ist [3, 4].

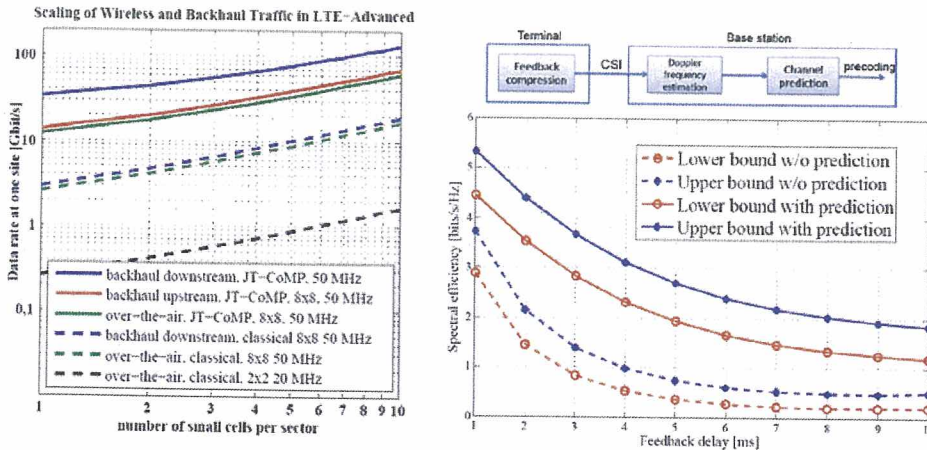


Abb. 5: Links: Skalierbarkeit von drahtloser und Backhaulkapazität entsprechend der Roadmap in LTE-A. Rechts: Feedbackmechanismus (oben). Spektrale Effizienz kooperierender Basisstationen mit verzögerter Kanalinformation mit und ohne Kanalprädiktion bei 30 km/h (unten).

Ein zweiter wesentlicher Aspekt waren die Latenzanforderungen für die Kanalinformation. Beiträge kommen aus der terminal- und basisstationsseitigen Signalverarbeitung der Kanalinformation, ihrer Übertragung über die Luft und die Verteilung auf alle kooperativen Basisstationen im Netzwerk. Zunächst wurden Techniken zur Latenzreduktion diskutiert. Mit einer neuen, echtzeitfähigen Feedback-Kompression konnte die Kanalinformation im Mittel um den Faktor 15 reduziert werden, wodurch auch eine schnellere Übertragung und somit eine reduzierte Latenz möglich ist [5].

Außerdem wurden eine analytische Abschätzung und eine Simulationsumgebung für das Verzögerungsverhalten im Backhaul-Netzwerk erarbeitet. Die Realisierbarkeit der CoMP-Ansätze über ein Zugangsnetz mit mehreren Knoten wurde untersucht und entsprechende Randbedingungen ermittelt. Die Verzögerung wurden in einem exemplarischen FTTx-Netzwerk [3], sowie in Aggregationspunkten [6] bestimmt, physikalisch gesehen sind sie im vorgeschlagenen Konzept geringer als 1 ms. Im Vergleich dazu problematisch sind jedoch Verzögerungen auf der Luftschnittstelle. Sie erfordern schnellere Feedbackreports im Standard. Wie schon oben erwähnt, gab es zu Projektende eine Veröffentlichung [12], welche den Beitrag der Sicherheitsarchitektur in LTE zu den auftretenden Verzögerungen erstmals offenlegte. Hier besteht offensichtlich Handlungsbedarf in nachfolgenden Projekten. Die Auswirkungen der Verzögerung auf die Performanz wurden umfassend anhand eines neuen, einfach handhabbaren Bewertungskonzepts charakterisiert. Die veraltete Kanalinformation wird anhand des mean-square-errors (MSE) gemessen. Das Signal-zu-Interferenz-und-Rausch Verhältnis (SINR) ist umgekehrt proportional zum MSE. Jedoch spielen die Kanaleigenschaften eine wesentliche Rolle. Indem hierfür idealisierte Annahmen getroffen werden, kann der Zusammenhang zwischen SINR und MSE für zufällige Kanäle sehr einfach eingegrenzt werden kann [7-9]. Dabei zeigt sich dass das kooperative System durch Makrodiversität robuster gegenüber Verzögerungen wird. Durch eine in der Basisstation ausgeführte Prädiktion [11] kann die kooperative Übertragung etwa 3 bis 4-mal robuster gegen verzögerte Kanalinformation gemacht werden (Abb. 5, rechts). Schließlich wurde netzbasierte Synchronisation alternativ zu GPS diskutiert. Hier sind noch weiterführende Arbeiten erforderlich.

Abschließend wurden verschiedene Architekturansätze hinsichtlich der technischen Realisierbarkeit, Komplexität, Kosten und Flexibilität untersucht und bewertet. Eine Übersicht der wichtigsten Ergebnisse wurde in einem eingeladenen Beitrag [4] auf der ICC 2013 sowie in einem angenommenen Beitrag im IEEE Communications Magazine veröffentlicht [14].

AP3 DWDM-Laser

Wichtige Komponenten für heutige optische (D)WDM Access-Netze sind kostengünstige, direkt modulierbare und wellenlängen-durchstimmbare Single-Mode Laser, welche sich präzise auf das gewünschte WDM-Frequenzraster einstellen lassen. Das im Teil-Projekt verfolgte Entwicklungskonzept basiert auf einem hybrid integrierten External Cavity Laser (ECL), welcher aus einem Halbleiter-Gain-Chip und einem polymerwellenleiter-basierten Reflexionsgitter realisiert wurde. Das Performance-Ziel war ein ECL, welcher mit 10Gb/s direkt modulierbar und durch thermo-optische Regelung mindestens 20nm in der Wellenlänge verstimmbar ist.

Abb. 6 zeigt den schematischen Aufbau des entwickelten EC-Lasers. Links erkennt man den InP-Gain-Chip zur Erzeugung des Laserlichts. Der Laserresonator wird hier durch die verspiegelte Gain-Chip Facette (HR) auf der linken Seite und dem Polymer-Reflexions-Gitter (rote Sektionen) auf der rechten Seite gebildet. Die Wellenlängenverstimmung erfolgt durch Einprägung eines Heizstroms, welcher das Polymer erhitzt. Die Koppelstelle der optischen Wellenleiter zwischen Gain-Chip und Polymer spielt eine herausragende Rolle für die Eigenschaften des Lasers, da diese innerhalb des Laserresonators liegt. Zwingend erforderlich ist eine Optimierung dieser Koppelstelle hinsichtlich sehr kleiner optischer Verluste, um Reflektionen innerhalb des Laserresonators durch diese Koppelstelle zu vermeiden. Aus diesem Grund wurde die der Wellenleiter des InP-Gainchips an der Koppelfacette um 9° schräg gestellt. Auf dem Polymer-Chip entspricht dies einem Winkel von 19° .

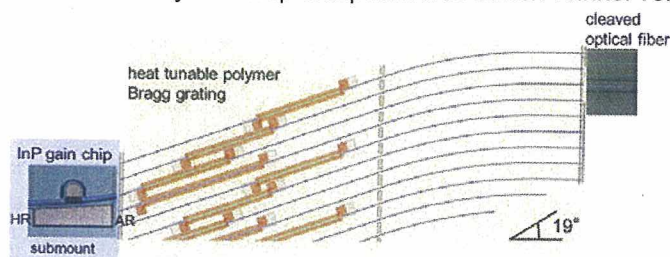


Abb. 6 Schematische Darstellung des durchstimmbaren External Cavity (EC) Lasers

Kommentar [A1]: Fehlt noch!!!

Mit Hilfe des wellenleiterintegrierten Tapers (vgl. Abb. 7) wird zusätzlich an der Frontfacette des InP-Gain-Chips eine Aufweitung des optischen Nahfeldes erreicht, was eine optimale Anpassung an das Nahfeld des Polymer-Wellenleiters gewährleistet. Zu Beginn des Teilvorhabens wurden die entsprechend konzipierten Gain-Chips mit einem frontseitig integrierten optischen Taper erfolgreich hergestellt. Die Integration dieses Tapers erfordert die Nutzung der Buried-Heterostructure-Wellenleiterstruktur (BH), welche gleichzeitig niedrige Schwellströme ($<10\text{mA}$) erlaubt. Abb. 7 zeigt mikroskopische Aufnahmen von drei Gain-Chips mit Längen von $250\mu\text{m}$, $300\mu\text{m}$ und $400\mu\text{m}$, deren Frontfacette zusätzlich 9° schräg gestellt ist. Die wesentlichen Entwicklungsziele für die aktiven InGaAsP-MQW-Schichten der Gain-Chips waren eine große differentielle Verstärkung (große Modulationsbandbreite) und gleichzeitig ein spektral ausreichend breites Verstärkungsspektrum (großer Durchstimmbereich).

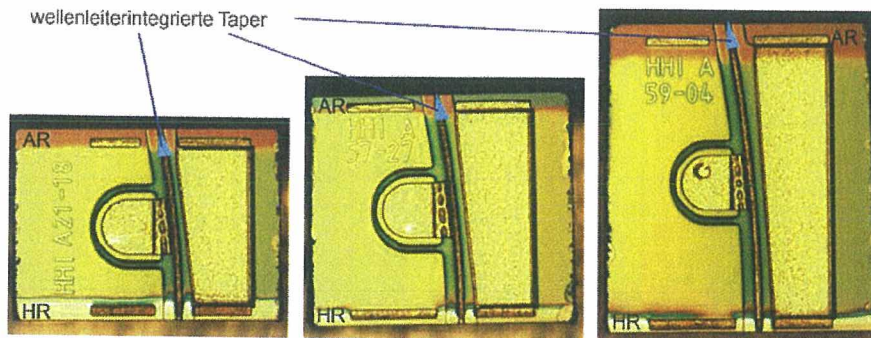


Abb. 7 Hergestellte, vereinzelt InP-Gain-Chips mit 250μm, 300μm und 400μm Länge mit Positionen der wellenleiterintegrierten Taper. Frontfacette AR-, Rückfacette HR-Beschichtung

Parallel zu den Arbeiten zum Gain-Chip wurde die Entwicklung der Gitterstrukturen in Polymer-Wellenleitern durchgeführt. Wie in Abb. 8 dargestellt, wurden die Polymer-Gitter als vergrabene Wellenleiterstruktur realisiert werden. Nach Aufbringen der Wellenleiterschicht ($n=1.47$) werden daher als erster Schritt zunächst Wellenleiter und Gitter strukturiert. Anschließend wird zum Schutz noch eine Cladding-Schicht ($n=1.45$) aufgebracht. Die wichtigsten Entwicklungsziele bei der Herstellung der Polymer-Gitter waren:

- Erreichen einer schmalen spektralen Reflexions-Bandbreite, um einen Single-Mode-Betrieb des EC-Lasers zu gewährleisten.
- die Reflexion des Gitters sollte zwischen 20 und 60% einstellbar sein.
- Gleichzeitige Realisierung einer möglichst kurzen Polymer-Gitterbaulänge, um kurze Laserresonatoren und damit große Modulationsbandbreiten zu erreichen.
- Herstellung der Polymer-Gitter mittels konventioneller Fotolithographie (Low Cost), anstelle von Holographie oder E-Beam.
- Erreichen eines thermischen Durchstimmbereiches von 20nm

Hergestellt und untersucht wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Varianten von Polymer-Gittern 3. und 5. Ordnung. Insbesondere wurden die Gittertiefe H , das Steg/Lücken-Verhältnis (Duty) und die Länge der Gitter variiert (vgl. Abb. 8).

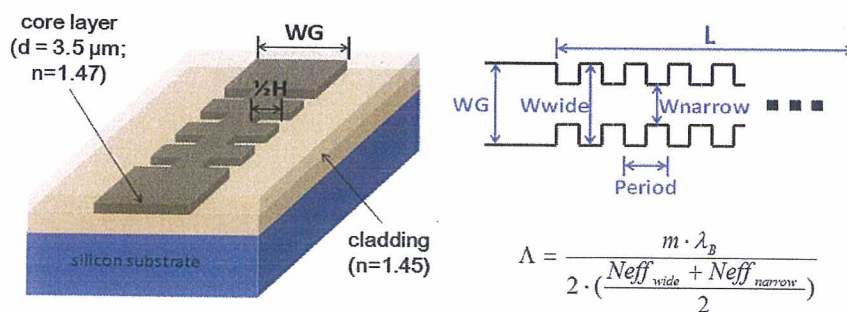


Abb. 1 Schematische Darstellung eines Polymerwellenleiters mit integriertem Brechungsindex-Gitter (links) und Definition der Gitterparameter (rechts): m ... Gitterordnung, Λ ... Gitterperiode, λ_B ... Bragg-Wellenlänge

Abb. 9 zeigt exemplarisch den Einfluss des Duty-Faktors auf die Höhe der Reflexionskurve. Das Optimum der Reflektivität wird hier bei einem nominellen Duty von 45% erreicht. Dies bedeutet, dass bei diesem voreingestellten Duty-Wert in der

Praxis der gewünschte optimale Wert von 50% erreicht wird. Daraus lässt sich schließen, dass die Strukturbreiten prozessbedingt etwas breiter ausgefallen sind. Abb. 10 zeigt das Ergebnis der thermischen Verstimmung eines solchen Gitters mit Duty=45%. Man erkennt, dass sich die Wellenlänge des Reflexionsmaximums mit zunehmender Heizleistung zu kleineren Wellenlängen hin verschiebt. Physikalische Ursache hierfür ist die Abnahme des Polymer-Brechungsindex bei höheren Temperaturen.

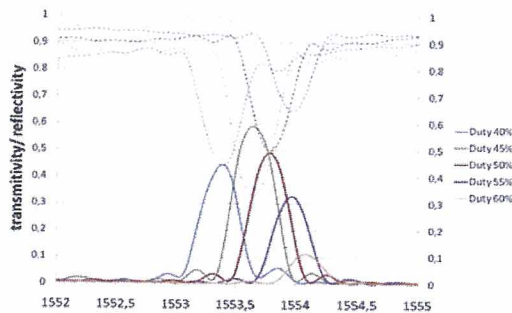


Abb. 9 Einfluss des Polymer-Gitter Steg/Lücken-Verhältnisses (Duty) auf die Höhe der Reflexionskurve bei einem Gitter 3. Ordnung.

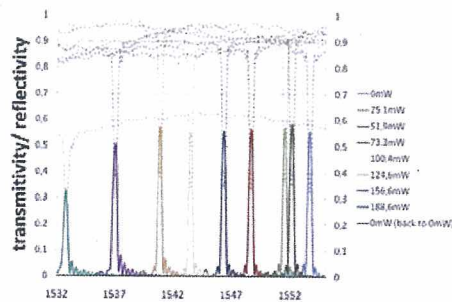


Abb. 10 spektrale Abhängigkeit des Reflexionsmaximums von der elektrischen Heizdrahtleistung für ein Gitter 3. Ordnung und Duty=45%

Abb. 11 zeigt eine REM-Aufnahme eines realisierten Polymer-Gitters. Deutlich sichtbar ist die technologisch-bedingte Verrundung der Gitterzähne. Diese führt zu einer Reduzierung der effektiven Gitterkopplung im Vergleich zu ideal rechteckigen Gitterzähnen und muss beim Design der Gitter berücksichtigt werden. (Physikalisch führt diese Verrundung bei den verwendeten Gittern höherer Ordnung zu einer Reduzierung der effektiv genutzten 1. Bragg-Ordnungskomponente der Fourierzerlegung der Gitterform im Vergleich zur angestrebten rechteckigen Gitterform. Dies kann durch die Wahl entsprechend größerer Gitteramplituden H (vgl. Abb. 8) auf der Maske kompensiert werden. Um die Gitter thermisch durchstimmen zu können, wurde in der ersten Generation der Polymer-Gitterwellenleiter auf der Claddingschicht direkt oberhalb des Gitters ein Heizdraht integriert. Hierbei wurde die Claddingschichtdicke soweit wie möglich reduziert, um eine effiziente thermische Anbindung des Heizdrahtes an das Polymer-Gitter zu erreichen.

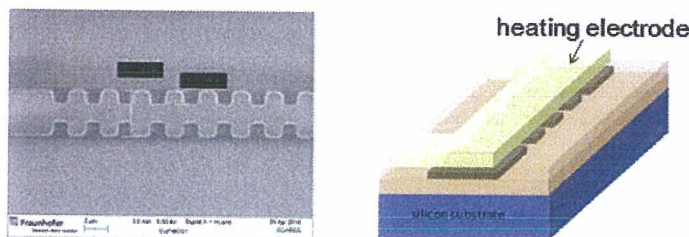


Abb. 11 REM-Aufnahme eines Polymer-Gitters (links) und schematische Darstellung eines Polymer-Gitters mit integriertem Heizdraht für die Wellenlängendurchstimmung

Nachdem die erste Generation von Polymer-Gitterwellenleitern erfolgreich prozessiert und charakterisiert wurde, wurden die daraus abgeleiteten Designoptimierungen in der zweiten Generation eingeführt. Das Maskenlayout ist in Abb. 12 zu sehen. Die neu entwickelte Geometrie der auf dem Polymer-Wellenleiter aufgetragenen Heizelektroden war ebenso vorgesehen, so dass mit Hilfe dieses Maskensatzes Polymer-Wafer mit verschiedenen Heater-Geometrien prozessiert werden können. Abb. 13 zeigt die beiden realisierten Wellenleitergeometrien. Der Polymer-Wellenleiter der zweiten Generation zeichnet sich dadurch aus, dass neben dem Wellenleiterkern sog. Luftgräben in das Polymer geätzt werden und die dadurch entstandenen Seitenwände mit Gold belegt werden, was zu einer deutlichen Reduzierung der benötigten Heizleistung führt.

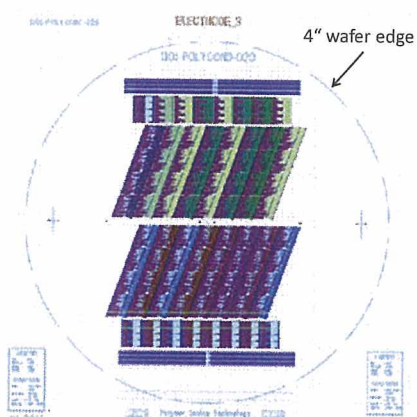


Abb. 12 CAD-Bild des zweiten Polymer-Gitterwellenleiter-Maskensatzes mit geraden und 19°-gewinkelten Wellenleiterstrukturen.

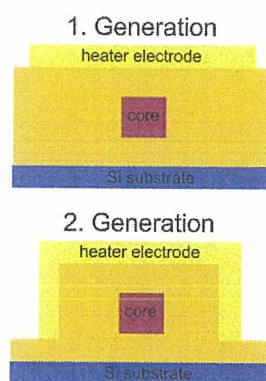


Abb. 13 Polymer-Wellenleitergeometrien der ersten und zweiten Generation

Erstmalig wurden die hergestellten Polymer-Grating-Wellenleiter zusammen mit davor justierten InP-Gain-Chips (vgl. Abb. 6) vermessen und erfolgreich einmodiger Laserbetrieb verifiziert. Abb. 14 zeigt die Laserspektren eines hybriden Polymer-Lasers mit 300µm langen InP-Gain-Chip und 1250µm langem Polymer-Gitter der ersten Generation. Die im Projekt anvisierten 20nm Verstimmbereich wurden mit einer Heizleistung von 185mW erfolgreich demonstriert, die Laser zeigen über den gesamten Verstimmbereich eine exzellente Seitenmodenunterdrückung (SMSR) >40db. Abb. 15 zeigt die in dieser Konfiguration erzielten Ausgangsleistungen abhängig vom Pumpstrom für Polymer-Gitter-Wellenleiter mit verschiedenen Reflektivitäten. Die gezeigten Laserausgangsleistungen sind für alle Gittervariationen über 13mW bei 100mA Pumpstrom und wurden fasergekoppelt gemessen, d.h. eventuelle Koppelverluste sind bereits in die Messergebnisse eingeflossen.

Der in Abb. 16 gezeigte Polymer-Chip entspricht dem neuesten, im Projekt realisierten, Layout der vierten Generation, bei welchem die Heizstrom-Kontakte für die Phasen- und Gittersektion separiert sind, um ein thermisches Übersprechen zu vermeiden. Gleichzeitig wurde das Layout der Polymer-Chips grundlegend verändert.

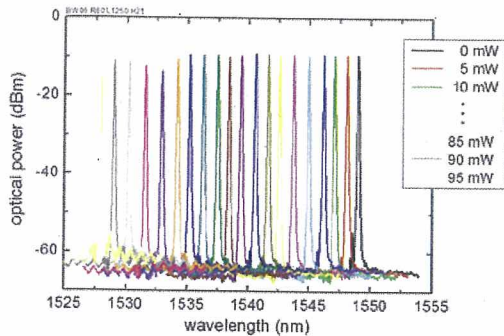


Abb. 14 Laserspektren bei verschiedenen Heizleistungen für ein 1250µm langes Gitter der zweiten Generation (vgl. Abb. 5).

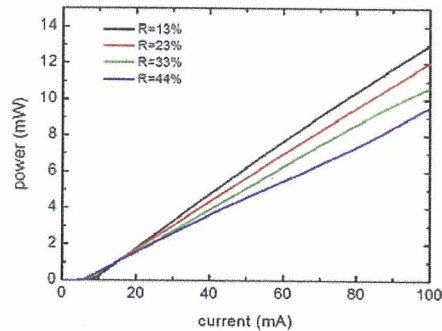


Abb. 2 Fasergekoppelte PI-Laserkennlinien für Polymer-Gitter der zweiten Generation mit unterschiedlichen Reflektivitäten

Das Design der Gitter der Vorgeneration war kompakt, um möglichst viele Designvariation auf einem Wafer unterzubringen. Im Projektverlauf konnten vielversprechende Designvarianten identifiziert und die Anzahl der zu realisierenden Designs reduziert werden. Das neue Polymer-Chipdesign beinhaltet nun nur noch einen Wellenleiter mit integriertem Gitter pro Chip, was im Hinblick auf Submount- und Modulaufbau vorteilhaft ist. Darüber hinaus wurden die Kontaktpads für den Heizstrom vergrößert und an festgelegten Stellen an der Chipkante positioniert. Dies vereinfacht sowohl die Messtechnik als auch die Aufbautechnik, da die Kontakte unabhängig vom gewählten Gitterparametersatz immer an der gleichen Stelle liegen.

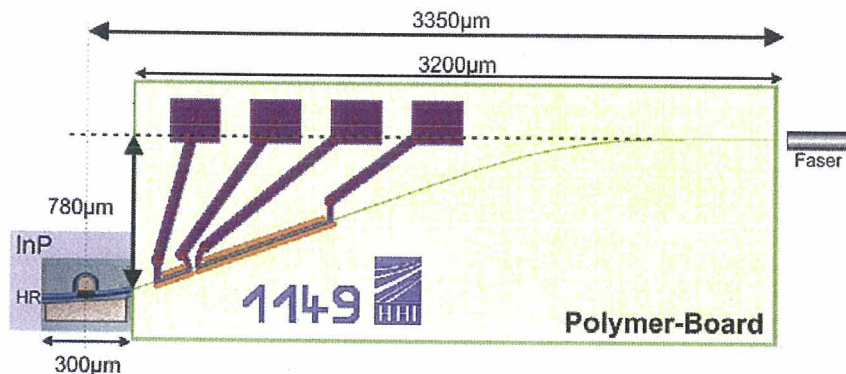


Abb. 3 Schematische Darstellung des durchstimmbaren External Cavity (EC) Lasers mit Polymer-Chip der vierten Generation, welche separate Kontakte für Phasensektion und Gitterheizer vorsieht.

Abb. 17 zeigt das CAD-Layout des 4-Zoll-Maskensatzes mit Einzel-Polymerchips. Zur Reduzierung der benötigten Heizleistung wurde die Geometrie der Heizelektrodensektion nochmals variiert. Die Heizelektrode liegt nun vergraben direkt unter dem optischen Wellenleiter, was in Abb. 18 gezeigt ist. Diese Geometrie der vierten Generation minimiert die Heizverluste an die Umgebungsluft, wodurch eine nochmals erhöhte Effizienz erzielt wird. Mit der neuen Heizelektrodengeometrie wird eine Verschiebung der Laseremissionswellenlänge von 20nm mit lediglich 54mW Heizleistung bei einer Gitterlänge von 700µm erreicht.

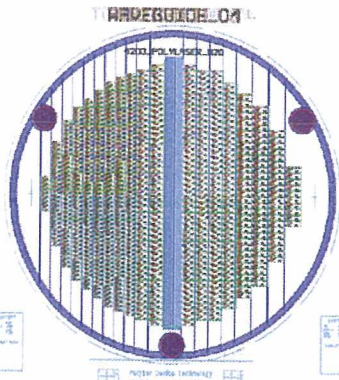


Abb. 4 CAD-Bild des Polymer-Gitterwellenleiter-Maskensatzes der vierten Generation mit einzelnen Polymer-Chips

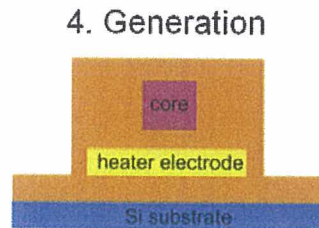


Abb. 5 Polymer-Wellenleitergeometrie der vierten Generation

Die Wellenlängenverstimmung ist in Abb. 19 für Betriebstemperaturen von 20°C und 45°C gezeigt. Die maximale Wellenlängenverstimmung beträgt ca. 35nm bei einer Heizleistung von 80mW erreicht. Die Emissionsspektren des hybriden InP-Polymer tunable DBR Lasers sind in Abb. 20 gezeigt. Die Wellenlänge wurde dabei über einen Verstimmbereich von mehr als 20nm exakt auf die sog. ITU-Grid (Kanäle 25-57) Wellenlängen eingestellt. Für jeden Kanal konnte dabei jeweils eine Seitenmodenunterdrückung SMSR>40dB erreicht. Die Seitenmoden-unterdrückung wurde mit Hilfe der in der Laserkavität vorhandenen Phasensektion optimiert.

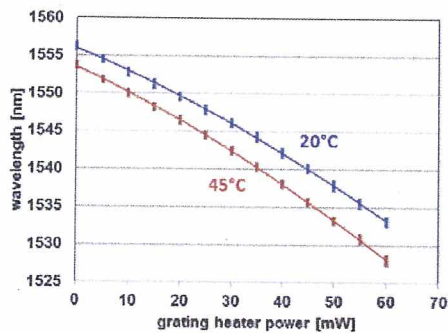


Abb. 6 Wellenlängenverstimmung eines 700µm langen Polymergitters bei 20°C und 45°C Betriebstemperatur.

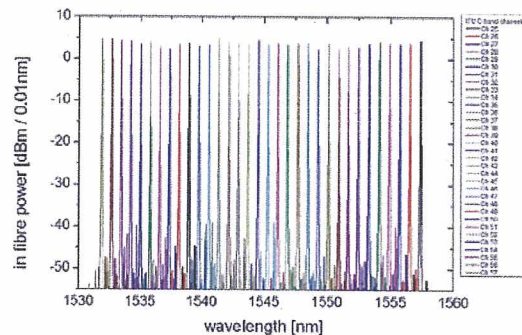


Abb. 20 Emissionsspektren des hybriden tunable DBR Lasers eingestellt auf ITU-Grid Kanäle mit SMSR>40dB.

Die gezeigten Messergebnisse wurden an sog. Subassemblies gemessen, bei denen der InP-Gainchip und der Polymerchip mit verstimmbar DBR-Gitter fest auf einen Siliziumträger aufgebracht sind. An der Ausgangsfacette ist eine Singlemodefaser angeklebt. Abb. 21 zeigt ein solches Submount mit InP-Gainchip auf der linken Seite, dem Polymerchip in der Mitte (Prinzip vgl. Abb. 16) und der Auskoppelfaser inkl. Fixierung auf der rechten Seite. An diesen Submounts wurden im Projektverlauf erstmals elektro-optische Kleinsignalhochfrequenzmessungen durchgeführt. Abb. 23 zeigt die Messergebnisse für einen hybriden DBR-Laser mit einer Gainchiplänge von 300µm, einer Phasenelektrodenlänge von 600µm und einer DBR-Gitterlänge von 700µm. Die Ergebnisse zeigen eine 3dB-Grenzfrequenz von 12GHz für vier

verschiedene Laseremissionswellenlängen von 1532nm bis 1555nm. Die realisierten Grenzfrequenzen sind mehr als ausreichend für den im Projekt vorgesehenen Betrieb bei 10Gbit/s. Für eine DBR-Gitterlänge von 1250µm und somit einer insgesamt längeren Laserkavität sind die Kleinsignalfrequenzgänge in Abb. 24 gezeigt. Auch mit dieser größeren Gitterlänge von 1250µm zeigt der hybride InP-Polymer DBR-Laser noch Grenzfrequenzen über 10GHz für alle Emissionswellenlängen.

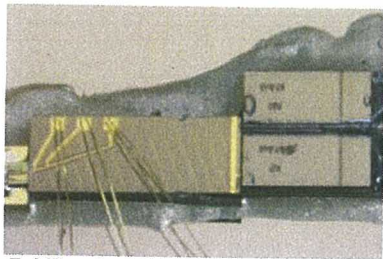


Abb. 7 Mikroskopbild des hybriden InP-Polymer-DBR-Laser im HF-Modul.

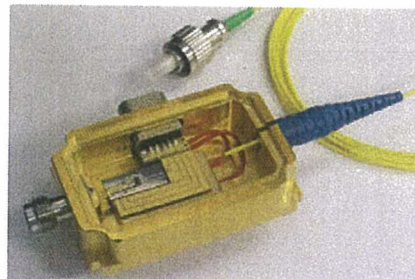


Abb. 22 Foto des Hochfrequenz-Moduls mit hybriden InP-Polymer DBR-Laser.

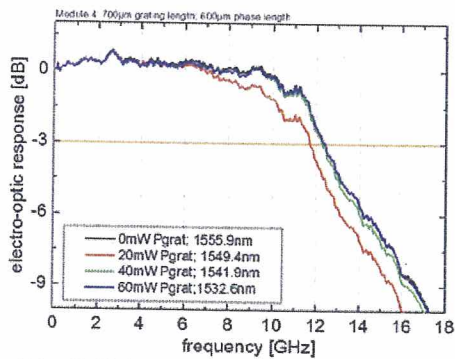


Abb. 23 Elektro-optische Kleinsignalmessung eines hybriden DBR-Laser-Submounts mit 700µm Gitterlänge.

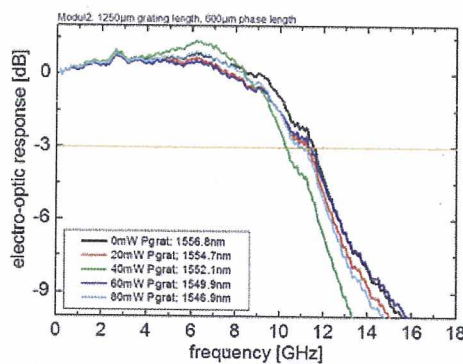


Abb. 24 Elektro-optische Kleinsignalmessung eines hybriden DBR-Laser-Submounts mit 1250µm Gitterlänge.

Für die Realisierung des im CONDOR-Projekt vorgesehenen Demonstrators war die Entwicklung eines hochfrequenztauglichen Moduls für den hybriden InP-Polymer DBR-Laser notwendig. In Abb. 22 ist das im Projekt entwickelte Hochfrequenzmodul gezeigt. Die Hochfrequenz wird über den V-Konnektor auf der linken Modulseite eingespeist. Die DC-Anschlüsse für die Temperaturregelung und -messung sowie für die Einspeisung der beiden Heizströme von Phasen- und Gittersektion für die Wellenverstimmung sind an der Gehäusesseite untergebracht und als Micro-D-Stecker ausgeführt. An diesen Modulen wurden im Berichtszeitraum erstmals Großsignalmessungen bei 10Gbit/s durchgeführt. Die bei einer Temperatur von 20°C gemessenen Großsignal-Augendiagramme für 12 verschiedene ITU-Kanäle sind in Abb. 25 dargestellt. Über einen Wellenlängenbereich von 26nm (ITU-Kanal 25 = 1557.36nm bis ITU-Kanal 58 = 1531.12nm) zeigt sich ein fehlerfreier back-to-back Betrieb mit einem dynamischen Extinktionsverhältnis über 7dB und einem Signal-Rausch-Verhältnis über 9. Der InP-Gainchip wurde dabei mit einem Strom von 60mA betrieben, die mittlere optische Ausgangsleistung am Modulstecker lag bei 3mW =

5dBm. Abb. 26 zeigt ein einzelnes 10Gbit/s-Augendiagramm bei 20°C. Um im Betrieb die benötigte Kühlleistung zu minimieren, werden temperaturstabilisierte Lasermodule für einen Betrieb von 45°C entworfen. Das Verstimmen der Wellenlänge auf Submount-Level wurde in Abb. 19 für 45°C-Betrieb gezeigt. Eine Großsignalmessung des Moduls mit hybridem InP-Polymer DBR-Laser ist in Abb. 27 dargestellt. Das dynamische Extinktionsverhältnis liegt weiterhin über 7dB, das Signal-Rausch-Verhältnis liegt bei 6.8. Ein fehlerfreier Betrieb bei 10Gbit/s des DBR-Laser-Moduls ist somit auch bei 45°C möglich.

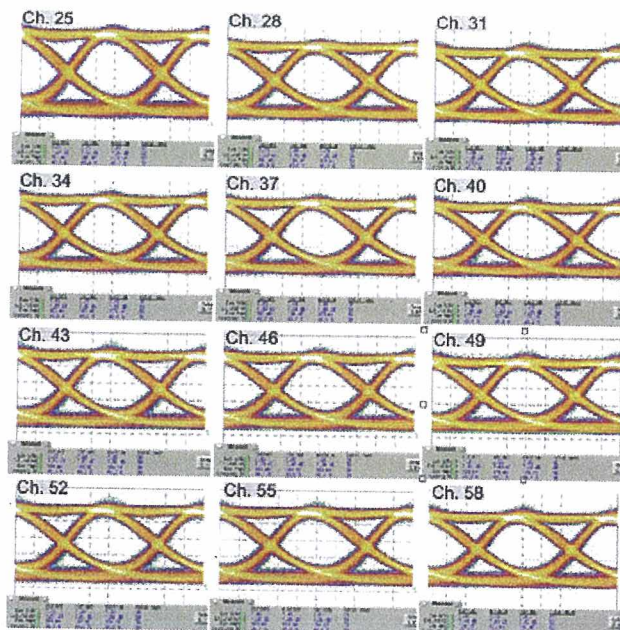


Abb. 8 Augendiagramme bei 10Gbit/s Direktmodulation des hybriden InP-Polymer-DBR-Lasers mit dynamischen Extinktionsverhältnissen über 7dB.

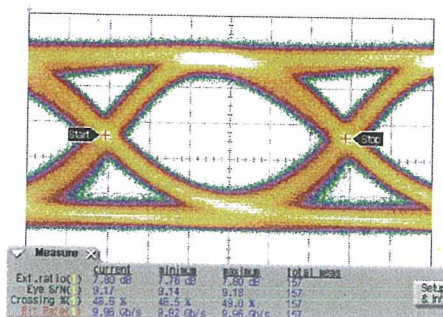


Abb. 9 Augendiagramme des hybriden InP-Polymer-DBR-Lasers bei 20°C Betriebstemperatur.

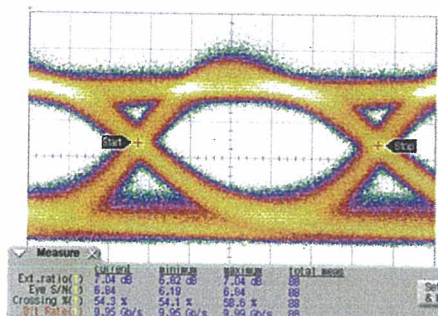


Abb. 27 Augendiagramme des hybriden InP-Polymer-DBR-Lasers bei 45°C Betriebstemperatur.

Für die Realisierung des im Gesamtprojekt vorgesehenen Demonstrators wurden zwei Module des hybriden InP-Polymer 10Gbit/s tunable DBR-Lasers an den Projektpartner Alcatel-Lucent abgegeben.

AP5 OFDM-Technologien

Für die optische Übertragung unter Anwendung der Subträgerbandtechnik werden direkt modulierbare Sende-Chips mit flachem Frequenzgangverlauf und möglichst großer Bandbreite benötigt, die eine verzerrungsfreie Frequenzmodulation ermöglichen, d.h. insbesondere kleine Werte der charakterisierenden Größen *Harmonic-Distortion* und *Intermodulation-Distortion* aufweisen. Ziel des Teilvorhabens war es, kurze DFB-Laser (Länge $\leq 200\mu\text{m}$) mit großer Modulationsbandbreite ($> 20\text{GHz}$) zu entwickeln und herzustellen, welche im 1550nm-Wellenlängenband emittieren.

Daher ist im Teilvorhaben vorgesehen, in der ersten Projektphase, anhand von am HHI in anderen Projekten bereits hergestellten unterschiedlichen direktmodulierbaren DFB- und EML-Komponenten die Eigenschaften solcher Komponenten bei Frequenzmodulation zu untersuchen. Diese Untersuchungen sollten an der UKA-IPQ durchgeführt werden. Es wurden zu diesem Zweck in Q1 unterschiedliche Laser- und EML-Varianten (vgl. Abb. 28) mit maximalen Modulationsbandbreiten zwischen 14 und 23GHz Projektpartner UKA-IPQ für Charakterisierungszwecke zur Verfügung gestellt.

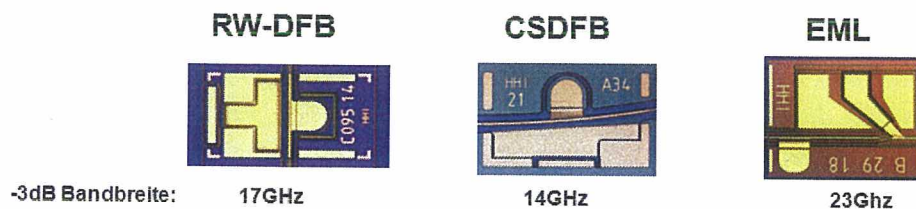


Abb. 10 an Projektpartner UKA-IPQ nach Projektstart in Q1 abgegebene Laser- und EML-Varianten für erste OFDM-Untersuchungen.

Durch Verkürzung der DFB-Baulänge lassen sich höhere Modulationsbandbreiten erreichen, vorausgesetzt die aktive MQW-Schicht ist „schnell“ genug.

Exemplarisch zeigt Abb. 28 das Ergebnis vom zu Beginn des Teilvorhabens durchgeführten Simulationsrechnungen zu 1300nm InGaAlAs RW-DFB-Lasern. Eine Reduzierung der DFB-Länge von $200\mu\text{m}$ auf $150\mu\text{m}$ führt bereits zu einer signifikanten Vergrößerung der Modulationsbandbreite. Im gezeigten Fall erhöht sich die Modulationsbandbreite von 16.7GHz auf 19.6GHz. Während die technologische Herstellung von DFB-Lasern mit einer Länge $< 200\mu\text{m}$ kein Problem darstellt, ist das Spalten und Handling derart kurzer Barren (insbesondere bei der Facettenbeschichtung und der Charakterisierung der Barren) sehr schwierig, da die Barren bei abnehmender Länge zunehmend instabiler werden und leicht brechen.

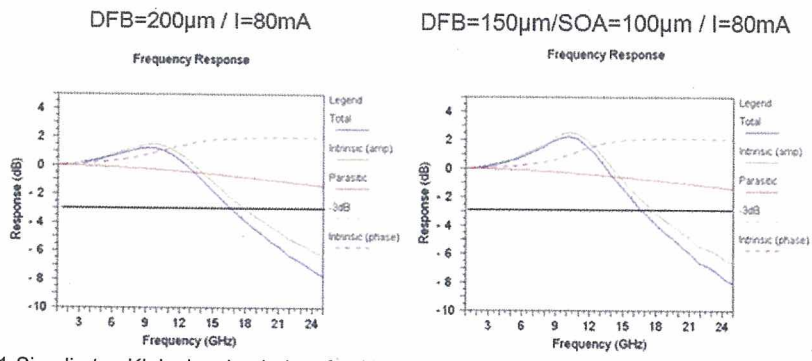


Abb. 11 Simuliertes Kleinsignalverhalten für 1300nm InGaAlAs RW-DFB-Laser mit unterschiedlicher Resonatorlänge und AR/60% Facettenbeschichtung.

Im Teilvorhaben wurde daher ein alternativer Weg unter Umgehung dieses Problems beschritten. Es wurden DFB-Laser realisiert, bei denen zwar die DFB-Länge reduziert wurde, nicht jedoch die Baulänge des Gesamtbauelements (vgl. Abb. 31). Es ergibt sich dadurch eine auf der Vorderseite des kurzen DFB-Lasers zusätzlich integrierte kleine SOA-Sektion, welche aktiv moduliert wird. Das Spalten und Handling der Barren verändert sich dadurch nicht. Ein Mikroskopfoto des Chiplayouts ist in Abbildung 19 gezeigt.

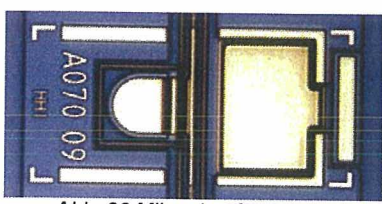


Abb. 30 Mikroskopfoto eines 200µmX400µm großen DML-Chip.

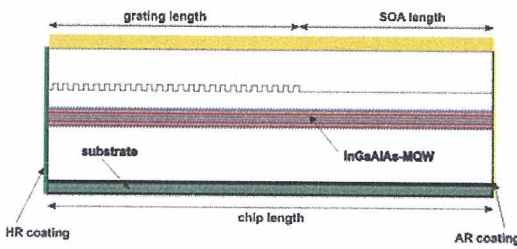


Abb. 31 Schematische Struktur des DFB-Lasers mit SOA-Verstärkersektion.

Nach Durchführung der Simulation wurde zur Bestätigung der gewonnenen Ergebnisse ein Maskensatz designt. Dieser umfasste zahlreiche Laservariationen mit unterschiedlich langen nachgeschalteten Verstärkern (SOA) (vgl. Abb. 31). Mit diesem neu entwickelten Maskensatz wurden zwei vollständige Wafer mit einem 1300nm-InGaAlAs-MQW und einem 1550nm-InGaAlAs-MQW prozessiert. Auf diesen Wafern wurde zusätzlich zu den verschiedenen Längenvariationen DFB-Laser mit 12 verschiedenen sog. Detuning-Varianten mittels E-Beam-Lithographie hergestellt. Dies bedeutet eine Verschiebung der DFB-Emissionswellenlänge gegenüber dem Photolumineszenzmaximum der aktiven InGaAlAs-MQW-Schicht. Ziel dieser Variation ist die Untersuchung der Abhängigkeit der Modulationsbandbreite vom differentiellen Gain der MQW-Schicht bei verschiedenen Wellenlängen. Der differentielle Gain ist eine essentielle physikalische Größe für die Modulationsbandbreite von direkt modulierten Lasern (DML) und sollte so groß wie möglich sein. Im Anschluss an die Herstellung der Wafer wurden Laserbarren mit unterschiedlichen Variationen der DFB-Gitterlänge mit optischen Reflexions- (HR) und Antireflexionsschichten (AR) beschichtet und einer Grundcharakterisierung unterzogen. Abb. 32 zeigt exemplarisch optische Spektren eines DMLs des 1550nm-

Wafers mit 150 μ m/45 μ m-Konfiguration. Die Seitenmodenunterdrückung ist 39dB für 20mA Pumpstrom und liegt bei ~50dB für Pumpströme ab 40mA. Die gemessenen PI- und UI-Kennlinien des gleichen Lasers sind in Abb. 33 gezeigt. Die maximale optische Ausgangsleistung bei 80mA Pumpstrom und 20°C beträgt sehr gute 26mW (14.1dBm). Die Kleinsignalfrequenzgänge für unterschiedliche Pumpströme eines 1550nm-DMLs sind in Abb. 34 dargestellt. Die maximale 3dB-Grenzfrequenz beträgt für diesen Lasertyp bei 100mA Pumpstrom 18.2GHz.

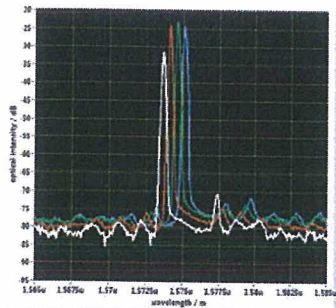


Abb. 32 Optische Spektren eines direkt modulierten 1550nm-Laser für vier verschiedene Pumpströme.

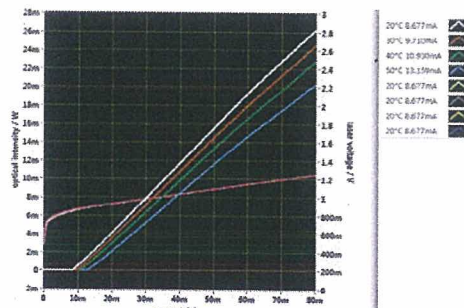


Abb. 12 PI- und UI-Kennlinien eines direkt modulierten 1550nm-Laser für vier verschiedene Temperaturen.

Ein weiterer Faktor, welcher die maximale Modulationsbandbreite des direkt modulierten Lasers reduzieren kann, ist die elektrische RC-Konstante des Lasers. Der Widerstand R setzt sich aus dem intrinsischen Widerstand der p-i-n-Diode in Durchlassrichtung sowie den Kontaktwiderständen von p- und n-Kontaktpad zusammen. Der kapazitive Anteil C ist bestimmt durch die Kapazität der p-i-n-Diode sowie die Kapazitäten, welche sich durch die notwendige Fläche der Goldkontakte ergeben. Ein möglichst geringer Wert ist für sowohl R als auch C erwünscht.

Zur Bestimmung der elektrischen Parameter der hergestellten Laserdioden wurden elektrischen S-Parameter-Messungen (in diesem Fall nur die elektrische Reflektion S11) an Laserdioden mit verschiedenen DFB/SOA-Konfigurationen vorgenommen. Die ermittelten Messkurven wurden mittels eines adaptierten Laser-Ersatzschaltbildes durch Multi-Parameter-Optimierung nachmodelliert und so die charakteristischen Größen R und C der Laserdioden ermittelt. Abb. 35 zeigt das Ersatzschaltbild des Lasers (R3 und C7) mit zusätzlichem Widerstand R2 und Induktivität L1, welche die Messleitung und Hochfrequenzstastkopf repräsentieren.

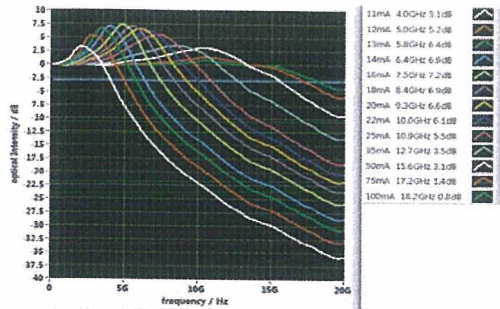


Abb. 13 Elektrooptische Kleinsignalfrequenzgänge eines 1550nm-Laser für vier verschiedene Pumpströme.

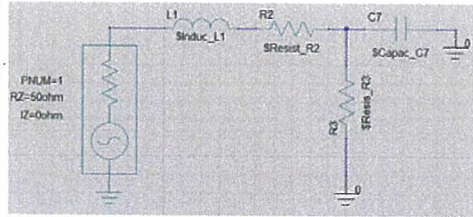


Abb. 14 Ersatzschaltbild einer Laserdiode im Schaltungssimulator. C7 und R3 bilden die Laserdiode nach, L1 und R2 repräsentieren den Widerstand und die Induktivität der Messleitung.

In Abb. 36 sind exemplarisch der Betrag (oben) und die Phase (unten) von Messungen und Simulation gezeigt. Es wird mit dem vorgeschlagenen Ersatzschaltbild eine gute Anpassung erreicht. Im Anschluss kann die maximale elektrische Bandbreite f_{3dB} der Laserdiode ermittelt werden. Tab. 1 listet die ermittelten Werte der Ersatzschaltbildkomponenten für vier DMLs mit zweimal 200 μ m und zweimal 120 μ m DFB-Sektionslänge auf. Es zeigt sich, dass für den kurzen Laser die Kapazität erwartungsgemäß sinkt, gleichzeitig aber der Widerstand aufgrund der kleineren Kontaktfläche ansteigt und in Summe die elektrische Grenzfrequenz der gesamten Laserstruktur sinkt. Dies muss bei der Optimierung der elektro-optischen Bandbreite berücksichtigt werden.

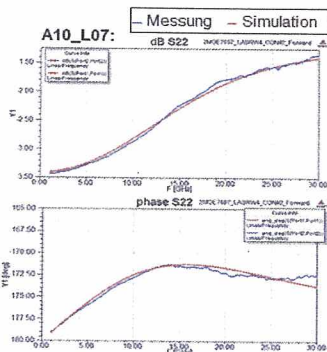


Abb. 15 Gemessene und simulierte elektrische S11-Parameter (oben Betrag in dB, unten Phase in deg) einer Laserdiode.

200 μ m	L1	R2	R3	C7	f_{3dB}
A092_L08	0.125pH	0.70ohm	5.05Ohm	1.203pF	31.3 GHz
A100_L03	0.125pH	0.966Ohm	5.150ohm	1.208pF	30.7 GHz

120 μ m	L1	R2	R3	C7	f_{3dB}
A10_L07	0.125pH	1.95Ohm	8Ohm	1.18pF	22.4 GHz
A10_L13	0.125pH	1.72Ohm	7.58Ohm	1.171pF	23.2 GHz

Tab. 1 Aus Ersatzschaltbildsimulation ermittelte Parameter von zwei Laserdioden mit 200 μ m und 120 μ m DFB-Gitterlänge

Im weiteren Projektverlauf wurden vier ergänzende Wafer mit 9 und 10 MQWs jeweils bei 1300nm und 1550nm prozessiert und ausgewählte DML-Chips einer vollständigen DC- und HF-Charakterisierung unterzogen. Da die 9-MQW-DMLs vielversprechendere Ergebnisse zeigen, werden diese hier dargestellt. Abb. 37 zeigt die Emissionsspektren eines 1550nm DMLs bei vier verschiedenen Pumpströmen. Es wird eine sehr gute Seitenmodenunterdrückung (SMSR) von über 40dB erreicht. Die zugehörigen PI-Kurven des gleichen Laserchips sind in Abb. 38 dargestellt. Die maximale Ausgangsleistung beträgt bei 100mA und 20°C 26mW. Bei einer Betriebstemperatur von 40°C zeigt sich eine Ausgangsleistung von 22.5mW bei einem Schwellstrom von lediglich 12mA. Dies sind Voraussetzungen für einen erfolgreichen 25Gbit/s Betrieb bei 40°C.

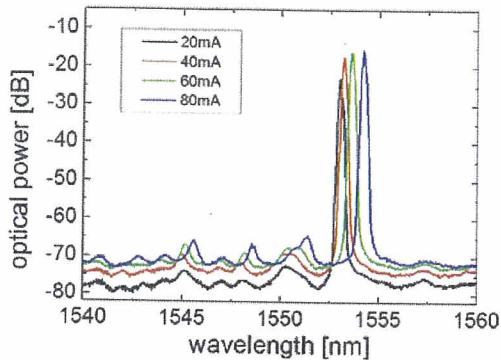


Abb. 16 Optische Spektren eines direkt modulierten 1550nm-Lasers für vier verschiedene Pumpströme.

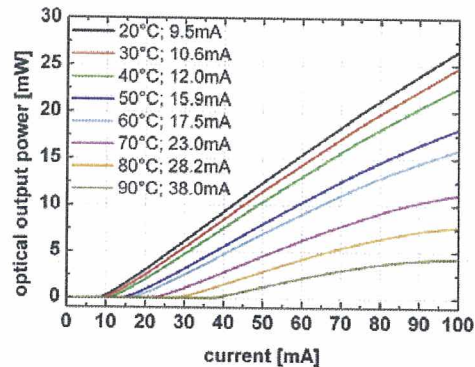


Abb. 17 PI- und UI-Kennlinien eines direkt modulierten 1550nm-Lasers für verschiedene Temperaturen.

Exemplarisch sind in Abb. 39 die elektro-optischen Kleinsignalfrequenzgänge eines 1550nm DMLs gezeigt. Die erreichte 3dB-Grenzfrequenz im 20°C-Betrieb liegt bei 22.3GHz bei einem Betriebsstrom von lediglich 50mA. Die vorherige Chip-Generation zum Vergleich erreichte bei 100mA $f_{3dB}=18.2\text{GHz}$. Die maximale Grenzfrequenz konnte also im Berichtszeitraum um mehr als 4GHz gesteigert werden, wobei der benötigte Pumpstrom halbiert wurde. Die Messungen des elektro-optischen Kleinsignalverhaltens bei 45°C sind in Abb. 40 gezeigt. Es ergibt sich eine 3dB-Grenzfrequenz von 17.2GHz bei 50mA Pumpstrom. Dies ist ausreichend für einen Betrieb bei 25Gbit/s. In gleichem Umfang wurden die DML-Wafer mit einer Emissionswellenlänge von 1300nm untersucht. Auch bei diesen wurde einmodiger Betrieb mit einer Seitenmodenunterdrückung von über 40dB erzielt, die Leistungen sind mit denen der 1550nm-Chips vergleichbar (hier nicht gezeigt).

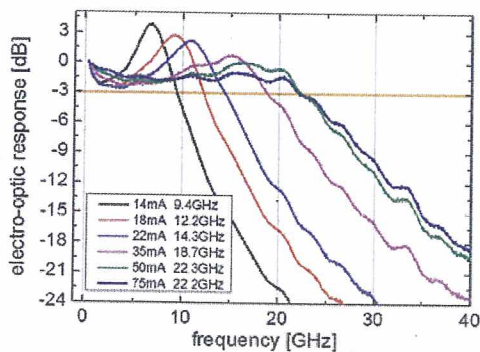


Abb. 39 Elektrooptische Kleinsignalfrequenzgänge eines 1550nm-Lasers für sechs verschiedene Pumpströme bei 20°C.

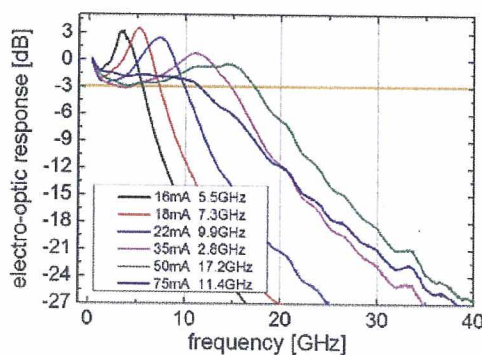


Abb. 40 Elektrooptische Kleinsignalfrequenzgänge eines 1550nm-Lasers für sechs verschiedene Pumpströme bei 45°C.

Im Projektverlauf wurde eine Großsignalanalyse von diversen DML-Chips der neuen 9-MQW-Generation mit Emissionswellenlängen von 1300nm und 1550nm durchgeführt. Abb. 41 zeigt exemplarisch ein back-to-back gemessenes Augendiagramm eines 1300nm DMLs bei einer Datenrate von 25.7Gbit/s (PRBS 231-1) und einer Betriebstemperatur von 45°C. Es zeigt sich eine sehr gute

Augenöffnung, welche fehlerfreien Betrieb ermöglicht. Das dynamische Extinktionsverhältnis beträgt 5.3dB bei einem Signal-Rauschverhältnis von 6.1. Erstmals wurde ein dieser DML-Chip bei einer Datenrate von 40Gbit/s charakterisiert, wobei die Betriebstemperatur auf 20°C gestellt wurde. Das entsprechende back-to-back Augendiagramm ist in Abb. 42 dargestellt. Das dynamische Extinktionsverhältnis beträgt hier 4.1dB mit einem Signal-Rauschverhältnis von 5.5.

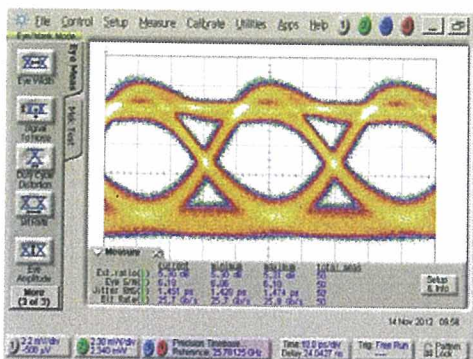


Abb. 18 Back-to-back Augendiagramm eines 1300nm-DMLs mit 25Gbit/s Datenrate (PRBS $2^{31}-1$) bei 45°C.

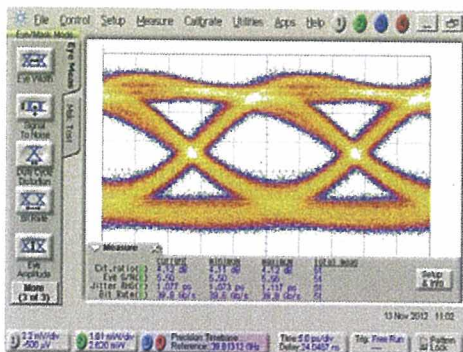


Abb. 19 Back-to-back Augendiagramm eines 1300nm-DMLs mit 40Gbit/s Datenrate (PRBS $2^{31}-1$) bei 20°C.

Im Rahmen der Großsignalcharakterisierung wurden erstmals auch Übertragungsexperimente mit einem 1300nm DML über 40km Standard-Singlemode-Faser (SSMF) durchgeführt. Die Arbeitstemperatur wurde hierbei auf 20°C beschränkt. Abb. 43 zeigt das erhaltene 25.7Gbit/s-Augendiagramm. Es ergibt sich ein dynamisches Extinktionsverhältnis von 6dB bei einem Signal-Rauschverhältnis von 5. Fehlerfreie Datenübertragung über eine Faserstrecke von 40km wurde somit erfolgreich demonstriert. Das entsprechende Messergebnis für eine Datenrate von 40Gbit/s ist im Abb. 44 gezeigt. Es wurde ein dynamisches Extinktionsverhältnis von 5.5dB bei einem Signal-Rauschverhältnis von 4.8 ermittelt. Erstmals konnte somit auch eine fehlerfreie Übertragung über 40km bei 40Gbit/s mit den im CONDOR-Projekt entwickelten DML-Chips realisiert werden.

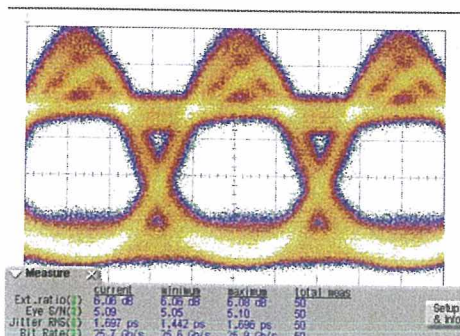


Abb. 43 Augendiagramm eines 1300nm-DMLs mit 25Gbit/s Datenrate (PRBS $2^{31}-1$) nach 40km Übertragung bei 20°C.

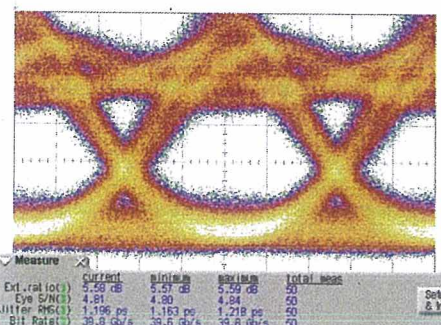


Abb. 20 Augendiagramm eines 1300nm-DMLs mit 40Gbit/s Datenrate (PRBS $2^{31}-1$) nach 40km Übertragung bei 20°C.

Im Berichtszeitraum 2012 wurden vier 1550nm 25Gbit/s-fähige direktmodulierte Laserdioden an den Projektpartner UKA-IPQ zur weiteren Analyse bezüglich optimaler OFDM-Performance geliefert. Zusätzlich wurde ein Hochfrequenz-Modul

für den DML-Chip (siehe Abb. 45) entwickelt, welches mit einem V-Konnektor für die Hochfrequenz sowie einem DC-Stecker für die Temperaturregelung ausgestattet ist. Im Januar 2013 wurden zwei dieser Module für den CONDOR-Projekt-demonstrator an UKA-IPQ übergeben.



Abb. 21 Hochfrequenzmodul für einen 25Gbit/s-DML mit HF-V-Konnektor und FC/APC-Faseranschluss.

6. Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Personalmittel:	1.645.367,63 EUR	(geplant: 1.598.309,00 EUR)
Materialkosten:	117.061,38 EUR	(geplant: 128.000,00 EUR)
Reisemittel:	17.353,03 EUR	(geplant: 31.700,00 EUR)
Invest:	34.820,60 EUR	(geplant: 38.259,00 EUR)
Summe:	1.814.602,37 EUR	(geplant: 1.796.268,00 EUR)

7. Verwertung und Nutzen der erzielten Ergebnisse

Wirtschaftliche und wissenschaftlich-technische Ergebnisverwertung

AP 1: Netzwerkarchitektur

Die Arbeiten in CONDOR haben wesentlich zum Verständnis des Netzwerks hinter verteilten, kooperierenden Basisstationen beigetragen. Die Anforderungen wurden erstmals auf Basis der im projektverlauf weit fortentwickelten Algorithmen statistisch fundiert quantifiziert. Aus Sicht des HHI sind nun fast alle Voraussetzungen gegeben, um diese Systeme auch netzübergreifend, und nicht nur an einem Standort, zu standardisieren und einzusetzen. Kooperative Basisstationen werden seit 10 Jahren intensiv erforscht. Sie könnten schon in 3-5 Jahren ein substantielles Upgrade des 4G Systems darstellen. Die wichtigsten offenen Fragen für Intersite-Kooperation waren das Backhaul und der Feedbackmechanismus, beide Fragen wurden in Condor umfassend behandelt. Die netzbasierte Synchronisation sowie die Sicherheitsarchitektur wurden während der Projektlaufzeit neu identifiziert, für die Synchronisation scheint es einen praktikablen Lösungsansatz zu geben (IEEE1588) der ggf. neu parametrisiert werden muss. Zu Backhaul und Feedback liegen belastbare Fakten vor, zur Synchronisation und zur Sicherheitsarchitektur des Backhails gibt es weiteren Forschungsbedarf.

In AP1 wurden am HHI aufgrund der in CONDOR gewonnenen Erkenntnisse zwei Direktaufträge aus der Industrie eingeworben. Es entstanden 1 Magazine-, 1 Journal- und 9 Konferenzveröffentlichungen, (davon 3x invited und 1x mit best paper award),

2 Masterarbeiten (Moritz Lossow, Lars Schulz), sowie wichtige Teilbeiträge für zwei laufende Promotionen (Konstantinos Manolakis, Michael Schlosser) und eine Habilitation (Volker Jungnickel) [13], die auch als Buch bei John Wiley & Sons erscheinen soll. Ein zusammenfassender Beitrag im IEEE Communications Magazine [14], zu dem CONDOR maßgeblich beigetragen hat, wurde akzeptiert. Die Ergebnisse werden im FP7 EU Projekt SODALES (2012-2015) weiter genutzt. Beim BMBF wurde ein Nachfolgeprojekt in der Ausschreibung „Sicherheit in kritischen Infrastrukturen“ eingereicht.

AP3 DWDM-Laser

Die im CONDOR Projekt gewonnenen Ergebnisse bezüglich des wellenlängenverstimmbaren hybriden InP-Polymer-Laser werden im BMBF Projekt „SASER“ sowie im Projekt „Kohärente Photonik Berlin“ des Landes Berlin weiterverwertet. Es wurden inzwischen drei 10G-tunable-Laser-Module an eine Firma in Asien verkauft. Darüber hinaus haben vier weitere Firmen sowie die Dublin City University Interesse am Erwerb von Modulen gezeigt. Es wurde mit einer im Berliner Raum ansässigen Firma eine Vereinbarung über den Aufbau von zahlreichen weiteren Modulen getroffen. In Kooperation mit einer zweiten Berliner Firma wird gegenwärtig zur weiteren Kommerzialisierung ein "Evaluation Board" (inkl. Stromquellen und GUI) zur einfachen elektrischen Ansteuerung der Laser-Module entwickelt. Die Firma Alcatel-Lucent (Projektpartner im CONDOR-Projekt) möchte die 2 im Projekt zur Verfügung gestellten Module kaufen und erwägt, diesen in AP3 entwickelten Laser-Typ im NGPON2 (Next-Generation PON) als Produkt einzusetzen. Eine koreanische Firma hat im September 2013 eine Bestellung über 5000 Stück der im CONDOR-Projekt entwickelten 10Gbit-fähigen InP-Gainchips erteilt.

AP5: OFDM-Technologien

Es zeigt sich derzeit großes Firmeninteresse an schnellen 25Gbit/s fähigen DMLs mit elektro-optischen Bandbreiten >20GHz. Aufgrund der im CONDOR Projekt erzielten Ergebnisse wird gegenwärtig in Kooperation mit einem großen amerikanischen Komponentenhersteller ein Entwicklungsprojekt zur Übertragung der im Projekt verwendeten Ridge-Waveguide-(RW)-Wellenleiterbauform in eine Buried-Heterostructure-(BH)-Bauform durchgeführt. Hierdurch wird sich die Performance im ungekühlten Laser-Betrieb verbessern, was wiederum eine Verringerung des Gesamtenergieverbrauchs bedeutet und somit für eine Reduzierung der Betriebskosten sorgt. An eine japanische Firma wurden nach Projektende 2 Module mit 1550nm DMLs verkauft. Eine weitere Vermarktung der direktmodulierten Laser wird auf den jährlich stattfindenden Messen der Konferenzen ECOC und OFC durchgeführt.

8. Bekannt gewordenen Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

AP 1: Netzwerkarchitektur

Während der Projektlaufzeit sind keine ähnlichen Arbeiten bekannt geworden, in denen das Backhaul für den Mobilfunk in vergleichbarer Art und Weise adressiert wird. Das Thema Open Networks, mit der Möglichkeit mehreren Netzbetreibern Zugang zu einer Infrastruktur zu geben, befindet sich jedoch gerade am Anfang der Entwicklung. Ein wesentliches Tool zur Beherrschung solcher geteilten Netzarchitekturen, die auch für viele andere Anwendungen wichtig sind, stellen sog.

software-defined networks (SDN) dar. Wie schon erwähnt gab es am Ende des Projekts eine Publikation [12], die die derzeitige Sicherheitsarchitektur von LTE als Ursache für die hohen Latenzen im Backhaul benennt. Auch im Hinblick auf die weitere Anwendungsentwicklung hin zum „taktilen“ Internet der Dinge müssen statt der derzeitigen zentralen Ansätze zukünftig dezentrale Methoden entwickelt und erprobt werden, um eine schnelle Interaktion der Basisstationen und damit standortübergreifende Interferenzreduktion möglich zu machen. Auch hierfür bietet SDN langfristige eine sehr gute Perspektive an. Ein entsprechender Nachfolgeantrag wurde gestellt.

AP3 DWDM-Laser

Es sind während der Projektlaufzeit keine Forschungsergebnisse von anderen Stellen bekannt geworden, welche eine gleiche oder ähnliche Technologie einsetzen. Darüber hinaus sind keine Ergebnisse bekannt geworden, welche durch eine anderweitige kostengünstige Technologieplattform zu den im Projekt erzielten Ergebnissen identische Performancedaten liefern.

AP5: OFDM-Technologien

Es wird weltweit, hauptsächlich in Japan, an der Entwicklung von schnellen direktmodulierten Laser gearbeitet. Während der Laufzeit des CONDOR-Projekts wurden jedoch keine Signifikanten Verbesserungen an anderer Stelle bekannt. Insbesondere ist der Einsatz von direktmodulierten Laserdioden für Subträgerbandtechnik (OFDM) mit eingehender Untersuchung von *Harmonic-Distortion und Intermodulation Distortion*, welche im CONDOR-Projekt explizit untersucht wurde, nicht erfolgt.

9. Veröffentlichung der im Projekt erzielten Ergebnisse

AP 1: Netzwerkarchitektur

- [1] M. Lossow, S. Jaeckel, V. Jungnickel, and V. Braun, **Efficient MAC Protocol for JT CoMP in Small Cells**, in Proc. 2nd IEEE International Workshop on Small Cell Wireless Networks (SmallNets), held in conjunction with IEEE ICC 2013, 9-13 June 2013, Budapest, Hungary.
- [2] W. Kreher, J. Müller, V. Jungnickel, S. Jaeckel, F. Bauermeister, A. Forck, T. Haustein, **Coordinated multi-point transmission COMP data and signalling on X2-interface using additional VLAN identifier**, European Patent Application, 22.09.2010.
- [3] V. Jungnickel, S. Jaeckel, K. Börner, M. Schlosser, and L. Thiele, **Estimating the Mobile Backhaul Traffic in Distributed Coordinated Multi-point Systems**, IEEE Workshop on Hybrid Optical Wireless Access Networks Program, held in conjunction with IEEE, WCNC, Paris, France, Apr. 2012.
- [4] V. Jungnickel, K. Manolakis, S. Jaeckel, M. Lossow, P. Farkas, M. Schlosser, V. Braun, **Backhaul Requirements for Inter-site Cooperation in Heterogeneous LTE-Advanced Networks**, *invited*, IEEE Workshop on Optical-Wireless Integrated Technology for Systems and Networks, held in conjunction with IEEE ICC 2013, 9-13 June 2013, Budapest, Hungary.

- [5] L. Schulz, K. Manolakis, and V. Jungnickel, **Adaptive Feedback Compression for Joint Transmission Coordinated Multi-Point**, in Proc. IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC), Dresden, 2-6 June 2013.
- [6] P. Farkas, M. Schlosser, **Limits of Ethernet based X2 Connections for LTE Advanced Base Stations**, 13. ITG Fachtagung Photonische Netze, Mai 2012.
- [7] K. Manolakis, L. Thiele, C. Oberli, T. Haustein, and V. Jungnickel, **Impairment Modelling for Joint Transmission CoMP**, *invited*, 2nd Int. Conf. on Wireless Communications, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace & Electronic System Technology (Wireless VITAE), IEEE, Chennai, India, March 2011.
- [8] K. Manolakis, C. Oberli, L. Herrera, and V. Jungnickel, **Analytical Models for Channel Aging and Synchronization Errors for Base Station Cooperation**, in Proc. 21st European Signal Processing Conference (EUSIPCO), European Signal Processing Society (EURASIP), Marrakech, Morocco, Sept. 2013.
- [9] K. Manolakis, C. Oberli, and V. Jungnickel, **Random Matrices and the Impact of Imperfect Channel Knowledge on Cooperative Base Stations**, *invited*, in Proc. IEEE SPAWC 2013, June 2013.
- [10] F. Rosas, L. Herrera, C. Oberli, K. Manolakis, and V. Jungnickel, **Downlink Performance Limitations of Cellular Systems with Coordinated Base Stations and Mismatched Precoder**, IET Communications, 2013, accepted.
- [11] K. Manolakis, S. Jaeckel, V. Jungnickel, and V. Braun, **Channel Prediction by Doppler-Delay Analysis and Benefits for Base Station Cooperation**, *best paper award*, in Proc. IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC), June 2013.
- [12] M. Fricke, A. Heckwolf, R. Herber, R. Nitsch, S. Schwarze, S. Voß, S. Wevering, **Requirements of 4G-Based Mobile Broadband on Future Transport Networks**, Journal of Telecommunications and Information Technology, vol. 2, pp. 21–28, 2012.
- [13] V. Jungnickel, **Multiple Antennas in Mobile Networks: From Fundamentals to Network MIMO Experiments**, Habilitationsschrift, TU Berlin, Fakultät für Elektrotechnik und Informatik, eingereicht am 20.11.2013.
- [14] Volker Jungnickel, Konstantinos Manolakis, Wolfgang Zirwas, Berthold Panzner, Mikael Sternad, Tommy Svensson, **The Role of Small Cells, Coordinated Multi-point and massive MIMO in 5G**, IEEE Communications Magazine, May 2014, accepted.

AP3 DWDM-Laser & AP5 OFDM-Technologien

- [15] F. M. Soares, Z. Zhang, G. Przyrembel, B. Zittermann, N. Mettbach, C. Zawadzki, M. Möhrle, N. Keil, N. Grote, “ **Hybrid Photonic Integration of InP-Based Laser Diodes and Polymer PLCs** ”, 23rd International Conference on Indium Phosphide and Related Materials 2011

- [16] H. Klein, C. Wagner, W. Brinker, F. Soares, D. Felipe, Z. Zhang, C. Zawadzki, N. Keil and M. Moehrle, "**Hybrid InP-Polymer 30 nm tunable DBR Laser for 10 Gbit/s direct Modulation in the C-Band**", 24th International Conference on Indium Phosphide and Related Materials 2012, Mo-1C.4
- [17] D. de Felipe, Z. Zhang, F. Soares, W. Rehbein, W. Brinker, H. Klein, C. Zawadzki, N. Keil and N. Grote, "**Widely-Tunable Polymer Waveguide Grating Laser**", ECIO 2012 Conference
- [18] D. de Felipe, Z. Zhang, C. Zawadzki, W. Brinker, H. N. Klein, F. Soares, M. Moehrle, N. Keil and N. Grote, "**Polymer Hybrid Integrated Devices for WDM-PON**", OECC 2012 Conference