

# FORSCHUNGS FORUM

**PADERBORN**



UNIVERSITÄT PADERBORN  
*Die Universität der Informationsgesellschaft*

13-2010



PADERBORNER WISSENSCHAFTSMAGAZIN

- Direct Manufacturing
- Expertenwissen in Sekunden
- Zuverlässigere IT-Dienste
- Raum und Kunst
- Datenautobahn der Zukunft
- Transformationen der Antike

# Beschleunigung für die Datenautobahn der Zukunft

Innovationspreis des Landes Nordrhein-Westfalen für die Professoren Reinhold Noé (CeOPP) und Ulrich Rückert (HNI)

Prof. Dr. Reinhold Noé, Prof. Dr. Ulrich Rückert

Der kontinuierliche Anstieg des weltweiten Datenverkehrs erfordert neue Datenübertragungskonzepte für die optischen Weitverkehrsstrecken, die das Rückgrat des weltweiten Kommunikationsnetzes bilden. Eine vielversprechende Möglichkeit, die Kapazität der bestehenden Glasfaser-Infrastruktur zu erhöhen, ist der Einsatz von mehrstufigen Modulationsverfahren in Kombination mit Polarisationsmultiplex und kohärentem Empfang. Zwar werden aufwendige Sender und Empfänger benötigt, um mehrere Informationseinheiten (Bit) pro optischem Symbol zu übertragen, aber diese neue Technologie ermöglicht auch eine sehr effiziente Nutzung der vorhandenen Infrastruktur, d. h. der verlegten Glasfasern. Die technische Herausforderung bei der Realisierung eines solchen praxistauglichen Übertragungssystems besteht in der Kompensation unterschiedlicher zeitvarianter Störfaktoren bei sehr hohen Symbolraten, die einen fehlerfreien Empfang der übertragenen Daten andernfalls verhindern. Die Entwicklung kohärenter optischer Empfänger profitiert dabei von den Fortschritten in der integrierten Schaltungstechnik, die eine digitale, massiv parallele Realisierung der erforderlichen Signalverarbeitung ermöglicht. Am 17. November 2008 wurden die beiden Paderborner Professoren Noé und Rückert für ihre Spitzenforschung auf dem Gebiet der optischen Nachrichtentechnik mit dem Innovationspreis des Landes Nordrhein-Westfalen in der Kategorie „Innovation“ ausgezeichnet.



Abb. 1: Mit dem Innovationspreis Nordrhein-Westfalen für herausragende marktrelevante Forschung und forschungsbasierte Innovation zeichnete die Landesregierung vertreten durch Innovationsminister Andreas Pinkwart (links) die Paderborner Professoren Reinhold Noé (rechts) und Ulrich Rückert (Mitte) aus.



Prof. Dr.-Ing. Reinhold Noé leitet das Fachgebiet Optische Nachrichtentechnik und Hochfrequenztechnik. Unterstützt von der Studienstiftung des deutschen Volkes studierte er Elektrotechnik an der TU München. 1987 promovierte er dort. Nach einem Jahr bei Bellcore (USA) ging er zu Siemens. 1992 wurde er nach Paderborn berufen. Er hat über 220 Publikationen veröffentlicht und ist in 160 Patentanmeldungen/Patenten als Erfinder genannt.



Prof. Dr.-Ing. Ulrich Rückert leitete das Fachgebiet Schaltungstechnik im Heinz Nixdorf Institut. Er studierte Informatik an der Universität Dortmund und promovierte dort 1989 in der Elektrotechnik. Bevor er 1995 nach Paderborn berufen wurde, war er zwei Jahre Universitätsprofessor im Bereich Mikroelektronik an der TU Hamburg-Harburg. Seit Oktober 2009 leitet er das Fachgebiet „Kognitronik und Sensorik“ an der Universität Bielefeld.

2008 erhielten Noé und Rückert den Innovationspreis des Landes NRW in der Kategorie Innovation.

## Einführung

Faseroptische Nachrichtennetze sind heute eine entscheidende Grundlage der Informationsgesellschaft. Die ersten Glasfaserstrecken wurden in den 1980er Jahren installiert und haben sich seither in der Weitverkehrstechnik, in Metronetzen und in lokalen Netzen mit hohen Datenraten durchgesetzt. Vorangetrieben durch die Datenkommunikation und immer neue Internetanwendungen steigen die weltweiten Anforderungen an Übertragungsbandbreite und Systemkapazität sehr schnell, sodass ein großer Bedarf zum Ausbau der bestehenden Netzinfrastruktur besteht.

In heutigen Glasfasernetzen wird als Modulationsverfahren die Intensitätsmodulation, das so genannte „On-Off-Keying“ (OOK), eingesetzt. Hierbei wird jedes einzelne Bit in ein optisches Zeichen (Symbol) übersetzt. Die Übertragungsrate der Symbole wird jedoch auf einem faseroptischen Kanal durch Dispersionseffekte, d. h. durch die zeitliche Ausweitung der Sendeimpulse, begrenzt. Zwar wurden in den vergangenen

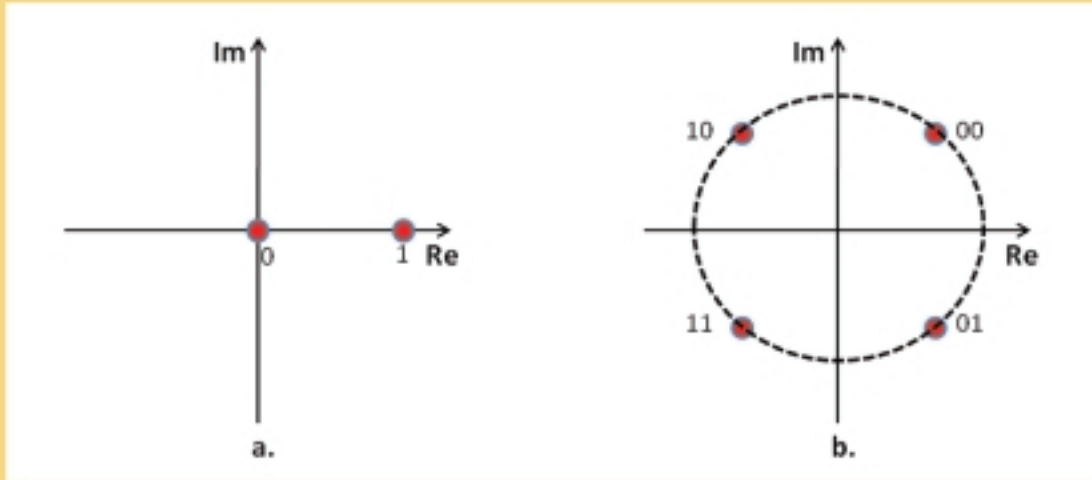


Abb. 2: Konstellationsdiagramme für die Modulationsformate OOK (links) und QPSK (rechts). Während bei OOK nur zwischen Null und Eins unterschieden wird, gibt es bei QPSK vier verschiedene Möglichkeiten, sodass mit jedem Symbol eine zweistellige Binärzahl (00, 01, 10, 11) übertragen werden kann.

Jahren Glasfasern mit verbesserten Dispersionseigenschaften entwickelt, die höhere Symbolraten ermöglichen, allerdings würde ein Austausch der verlegten Fasern erhebliche Kosten verursachen. Eine interessantere Alternative bietet der Einsatz höherwertiger Modulationsverfahren, wie zum Beispiel der Quadraturphasenumtastung (QPSK). Bei diesem Verfahren werden in einem Symbol gleich mehrere Bits (Informationseinheiten) untergebracht, sodass sich die Kanalkapazität bei gleichbleibender Symbolrate entsprechend vergrößert. In Abbildung 2 sind die Formate OOK und QPSK in Form von Konstellationsdiagrammen gegenübergestellt. Jedes gültige Symbol wird dabei als Punkt in der komplexen Zahlenebene dargestellt. Man erkennt, dass jedes QPSK-Symbol einen Informationsgehalt von 2 Bit besitzt.

Weiterhin lassen sich zwei senkrecht zueinander polarisierte Trägerwellen getrennt modulieren und zeitgleich über eine einzelne Glasfaser übertragen. Man erhält also zwei unabhängige Kanäle auf der gleichen optischen Frequenz. Durch den Einsatz dieses als Polarisationsmultiplex (PM) bezeichneten Verfahrens verdoppelt sich die Kanalkapazität nochmals.

In der Praxis verhinderten bislang eine Vielzahl von Störfaktoren sowie die hohe Verarbeitungsgeschwindigkeit im Empfänger den kommerziellen Einsatz von QPSK und PM. Erst die Fortschritte auf dem Gebiet der integrierten Schaltungstechnik ermöglichen heute die Rekonstruktion des übertragenen Signals mit Hilfe digitaler Signalverarbeitung. Schnelle Umwandlung der analogen Empfangssignale in einen digitalen Datenstrom und dessen Auffächerung durch spezielle schnelle Schaltungen (Demultiplexer) sind weitere unabdingbare Voraussetzungen zur Umsetzung der beschriebenen Konzepte.

Im Rahmen des von der Europäischen Union geförderten und durch die Universität Paderborn koordinierten Projekts „synQPSK“ wurde in den vergangenen Jahren ein Übertragungssystem realisiert, das unter Verwendung der Quadraturphasenumtastung (QPSK) in Kombination mit Polarisationsmultiplex (PM) die Kapazität der bestehenden optischen

Glasfasernetze vervierfacht. Die Arbeitsgruppen von Professor Noé und Professor Rückert entwickelten hierzu leistungsfähige und ressourceneffiziente Verfahren und Komponenten für die digitale Signalverarbeitung. Professor Noé ist mit seinem Fachgebiet „Optische Nachrichtentechnik und Hochfrequenztechnik“ Mitglied im CeOPP, dem interdisziplinären Paderborner Zentrum für Optoelektronik und Photonik, während Professor Rückert mit seinem Fachgebiet „Schaltungstechnik“ dem Heinz Nixdorf Institut (HNI) angehört.

### Übertragungssystem

Abbildung 3 zeigt das entwickelte Übertragungssystem mit QPSK-Modulation und Polarisationsmultiplex (PM-QPSK) für eine Übertragungsrate von 40 GBit/s. Die eingehenden Daten werden zunächst vorkodiert und anschließend mit Hilfe von zwei QPSK-Modulatoren auf den beiden PM-Kanälen gesendet. Nach der Übertragung über den optischen Kanal werden beide Polarisierungen im Empfänger getrennt und anschließend innerhalb spezieller optischer Bauelemente, die man als 90°-Hybride bezeichnet, jeweils mit dem Strahl eines lokalen Lasers optisch demoduliert und nach Inphasen- und Quadraturkomponente getrennt (kohärenter Empfänger). Nach der Übertragung der Signalkomponenten in den elektrischen Bereich mit Hilfe paarweise angeordneter Photodioden erfolgt die Rückgewinnung der übertragenen Daten innerhalb der digitalen Signalverarbeitungseinheit (DSPU).

Durch die Übertragung auf dem optischen Kanal werden die Sendesymbole erheblich verzerrt. Abbildung 4 zeigt die Auswirkungen der einzelnen Störgrößen auf den Symbolraum. Die gesendeten QPSK-Symbole erscheinen senderseitig zunächst auf vier einzelne Punkte konzentriert (Abbildung 4a). Durch den Rauschanteil der Faserverstärker werden die Symbole in der Umgebung dieser Punkte verteilt, die vier möglichen Zustände lassen sich jedoch noch gut unterscheiden (Abbildung 4b). Während der Übertragung über die Glasfaser treten jedoch Polarisationsseffekte auf, die zu einem Übersprechen zwischen den beiden Polarisations-

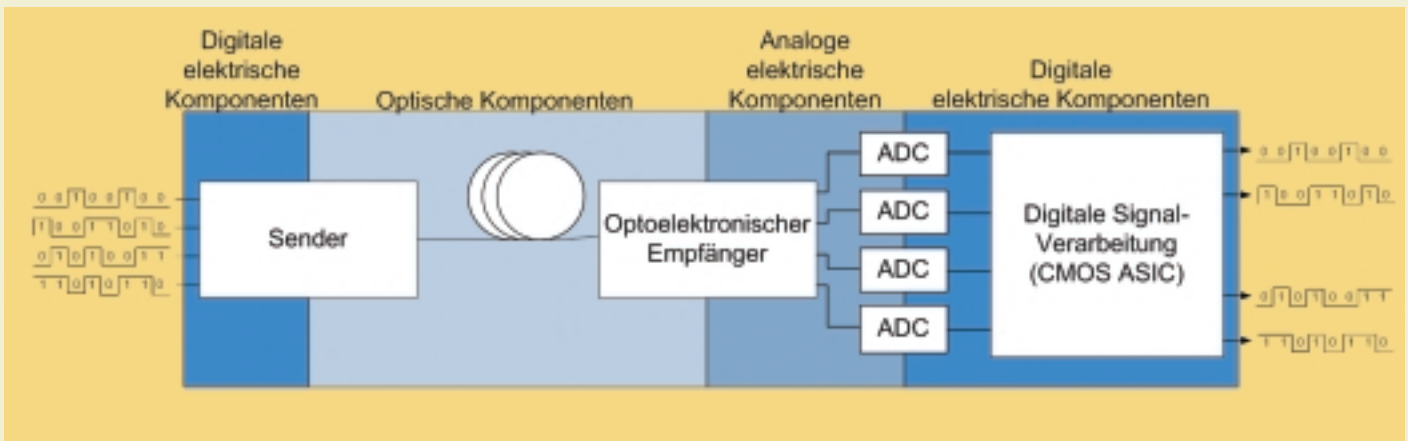


Abb. 3: QPSK-Übertragungssystem: Durch die Nutzung höherwertiger Modulationsverfahren und Polarisationsmultiplex wird die Übertragungsrate bestehender Glasfaserübertragungsstrecken vervierfacht.

moden sowie zu polarisationsabhängigen Dämpfungen führen können (Abbildung 4c). Diese Effekte führen zu einer kleblattförmigen Aufblähung der Punktwolken, die nun nicht mehr scharf voneinander abgegrenzt sind. Während der optischen Demodulation im kohärenten Empfänger entsteht durch die unvollkommene Abstimmung zwischen senderseitigem und empfängerseitigem Laser eine Zwischenfrequenz, die zu einer unregelmäßigen Rotationsbewegung des Koordinatensystems führt. Die Punktwolken aus den mittleren Abbildungen verschmelzen dadurch zu einem Ring, in dem zunächst keine Unterscheidung der gesendeten Symbole mehr möglich erscheint (Abbildung 4d). Die Aufgabe der im Folgenden beschriebenen digitalen Signalverarbeitung ist es daher, zunächst die Störungen aus dem optischen Bereich zu kompensieren (Trägerrückgewinnung, Polarisationsregelung), sodass anschließend mit ausreichender Zuverlässigkeit entschieden werden kann, welches Symbol eigentlich gesendet wurde (Datenrückgewinnung).

### Vorwärtsgekoppelte Trägerrückgewinnung

Eine zentrale Herausforderung bei der kohärenten Übertragung ist die Schätzung der Zwischenträgerschwingung, die man sich als Drehbewegung im Symbolraum vorstellen kann. Die beiden nicht exakt aufeinander abgestimmten Laser verursachen zum einen eine niedrige Zwischenträgerfrequenz vergleichbar mit einem Schwebungston in der Akustik, zum anderen rauschen beide mehr oder weniger stark, wodurch die Zwischenträgerfrequenz unregelmäßig wird (Phasenrauschen). Eine unregelmäßige und sehr schnelle Bewegung, nämlich der resultierende Phasenverlauf, muss also in Echtzeit geschätzt werden. Eine exakte Rückgewinnung des Phasenverlaufs ist nicht möglich, allenfalls eine gute Schätzung. Während dieses Schätzprozesses wird das ursprüngliche Signal zwischengespeichert und verzögert, damit der geschätzte Phasenverlauf an der zeitlich richtigen Stelle verwendet werden kann. Durch diese als Vorwärtskopplung bekannte Methode kann bei der Phasenschätzung sogar in begrenztem Maße auf „zukünftige“ Werte zugegriffen werden.

Die bekannten Standardmethoden aus der Literatur für

derartige Schätzprobleme sind mathematisch recht aufwendig, sie erfordern z. B. Multiplikationen komplexer Zahlen und gewichtete Mittelwerte. Im Rahmen des Projektes synQPSK wurde eine neuartige, winkelbasierte Phasenschätzmethode entwickelt, die besonders hardwareeffizient und schnell ist: Es werden keine komplexen Berechnungen und mehrfachen Koordinatenumwandlungen benötigt, nur ganzzahlige reelle Additionen und Subtraktionen mit wenigen Stellen. Dadurch verkürzt sich auch die Zwischenspeicherungszeit bei der Vorwärtskopplung erheblich.

### Adaptive Polarisationsregelung

Die Polarisationsregelung ist beim Einsatz von Polarisationsmultiplex nötig, um die beiden Datenkanäle wieder voneinander zu trennen. Das ist zwar nicht ganz so zeitkritisch wie die oben beschriebene Trägerphasenrückgewinnung, dafür aber mathematisch viel anspruchsvoller. Das empfangene Symbolpaar (mathematisch ein Vektor) muss zur Kompensation unterschiedlicher Dämpfungen und des Übersprechens

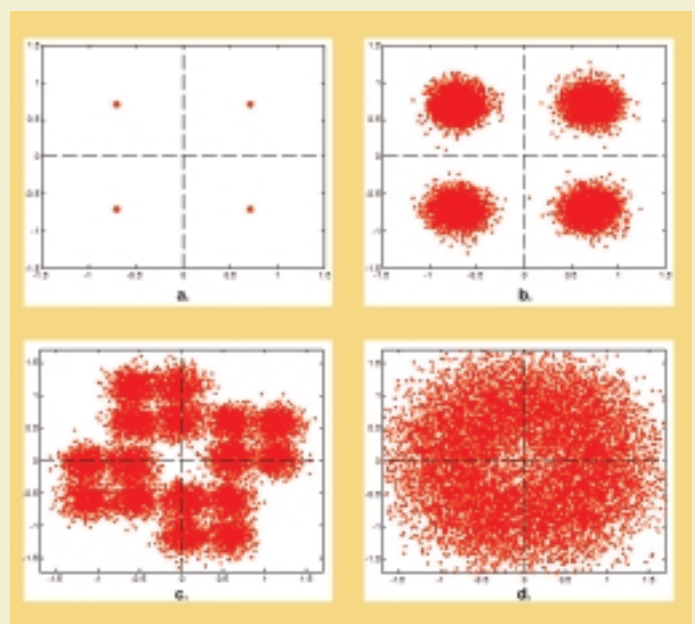


Abb. 4: QPSK-Symbole unter dem Einfluss unterschiedlicher Störfaktoren (v. l.): a) ungestörtes Sendesignal b) optisches Rauschen c) Polarisationsübersprechen

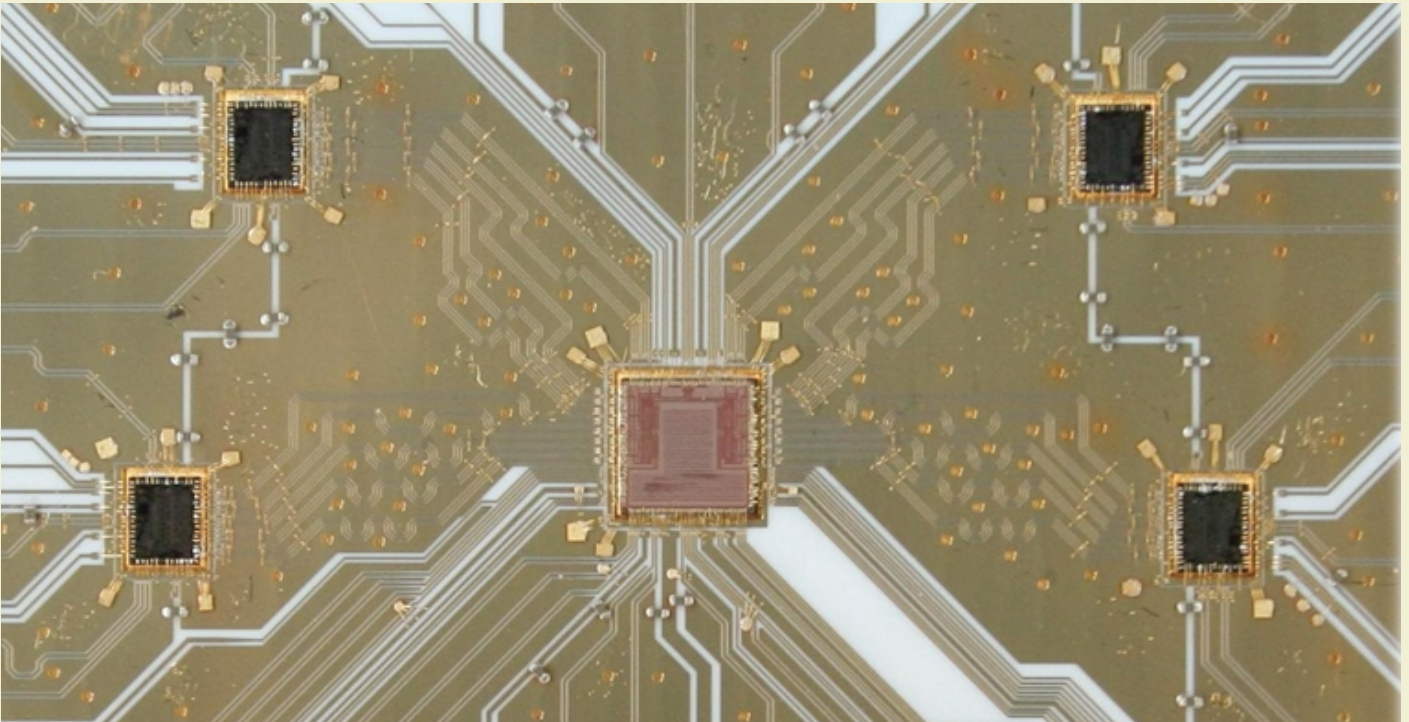


Abb. 5: Digitaler QPSK-Empfänger für eine Datenrate von 40 GBit/s – CMOS-Signalverarbeitungsbaustein mit vier SiGe-ADCs.

mit einer Matrix multipliziert werden. Beschreibt man diesen Vorgang mit reellen Zahlen, so sind jeweils 16 Multiplikationen erforderlich, weil die Kompensationsmatrix  $4 \times 4 = 16$  reelle Koeffizienten besitzt. Das Hauptproblem besteht in der gleichzeitigen optimalen Einstellung dieser 16 Koeffizienten. Die eigentliche Polarisationsregelung vergleicht das Ergebnis der Kompensation, also einen Vektor, mit einem theoretischen Optimum, das sich nach der Trägerphasen- und Datenrückgewinnung rekonstruieren lässt und ebenfalls ein Vektor ist. Mathematisch besteht dieser Vergleich zunächst in einer Korrelation der beiden Vektoren, deren Ergebnis wiederum eine Matrix ist. Nach zeitlicher Mittelung und einigen Umrechnungen kann die Korrelationsmatrix verwendet werden, um die Kompensationsmatrix zu verbessern, wobei man den in der Regelungstechnik häufigen Kompromiss von Schnelligkeit und Genauigkeit eingehen muss. Da die optische Übertragungsstrecke selbst sich zeitlich schnell ändern kann, hat hier im Allgemeinen die Schnelligkeit den Vorrang und wird eher begrenzt durch Stabilitätsbetrachtungen in der Matrizenrechnung als durch Genauigkeitsanforderungen. Den Arbeitsgruppen von Prof. Noé und Prof. Rückert ist nach der weltweit ersten kohärenten Echtzeitübertragung von QPSK-Symbolen (2006) auch die Erweiterung auf geregeltes Polarisationsmultiplex gelungen; bis heute setzen der verwendete Algorithmus und seine Implementierung bezüglich Regelgeschwindigkeit und Hardwareeffizienz Maßstäbe.

### **Digitale Signalverarbeitungseinheit**

Die beschriebenen Signalverarbeitungsverfahren wurden nach erfolgreicher Simulation zunächst prototypisch im Rahmen von Echtzeitexperimenten bei niedrigen Datenraten evaluiert und optimiert. Der Prototyp bestand aus kommer-

ziell verfügbaren Analog-Digital-Umsetzern (ADCs) und einem programmierbaren Logikbaustein (FPGA) zur Implementierung der Signalverarbeitung. Aufgrund der speziellen Anforderungen und der hohen Datenraten innerhalb kommerzieller optischer Übertragungssysteme mussten für die Signalverarbeitungsverfahren neue Komponenten entwickelt werden.

Abbildung 5 zeigt den digitalen QPSK-Empfänger für eine Übertragungsrate von 40 GBit/s bestehend aus vier schnellen Analog-Digital-Umsetzern und einem Signalverarbeitungsbaustein in der Mitte. Alle fünf Einzelkomponenten sind auf einer speziellen hochfrequenztauglichen Keramik aufgebaut.

Die vier Analog-Digital-Umsetzer wurden aufgrund der hohen Anforderungen an Schaltgeschwindigkeit und Frequenzverhalten in Silizium-Germanium-Technologie (SiGe) realisiert und beinhalten jeweils 3 378 Transistoren auf einer Fläche von  $5,4 \text{ mm}^2$ . Sie erreichen über 10 Milliarden Abtastungen pro Sekunde bei einer Auflösung von 5 Bit. Der Signalverarbeitungsbaustein wurde in einer 130 nm CMOS-Technologie realisiert. Er enthält neben den zuvor beschriebenen Verfahren zur Trägerrückgewinnung und Polarisationsregelung auch eine Taktrückgewinnung sowie eine Schnittstelle zur Überwachung und Steuerung des Bausteins. Um die geforderte Verarbeitungsgeschwindigkeit erzielen zu können, wurde eine massiv-parallele Architektur gewählt. Die Implementierung der Signalverarbeitung erfolgte teilautomatisiert auf Basis vordefinierter Logikgatter, den so genannten Standardzellen. Für die Anbindung der schnellen seriellen Eingangsdaten an die parallele Signalverarbeitung mussten zudem schnelle Demultiplexer entwickelt und in den Baustein integriert werden. Abbildung 6 zeigt vergrößerte Aufnahmen des Signalverarbeitungsbausteins sowie eines ADC. Anhand der Struktur lässt sich deutlich die

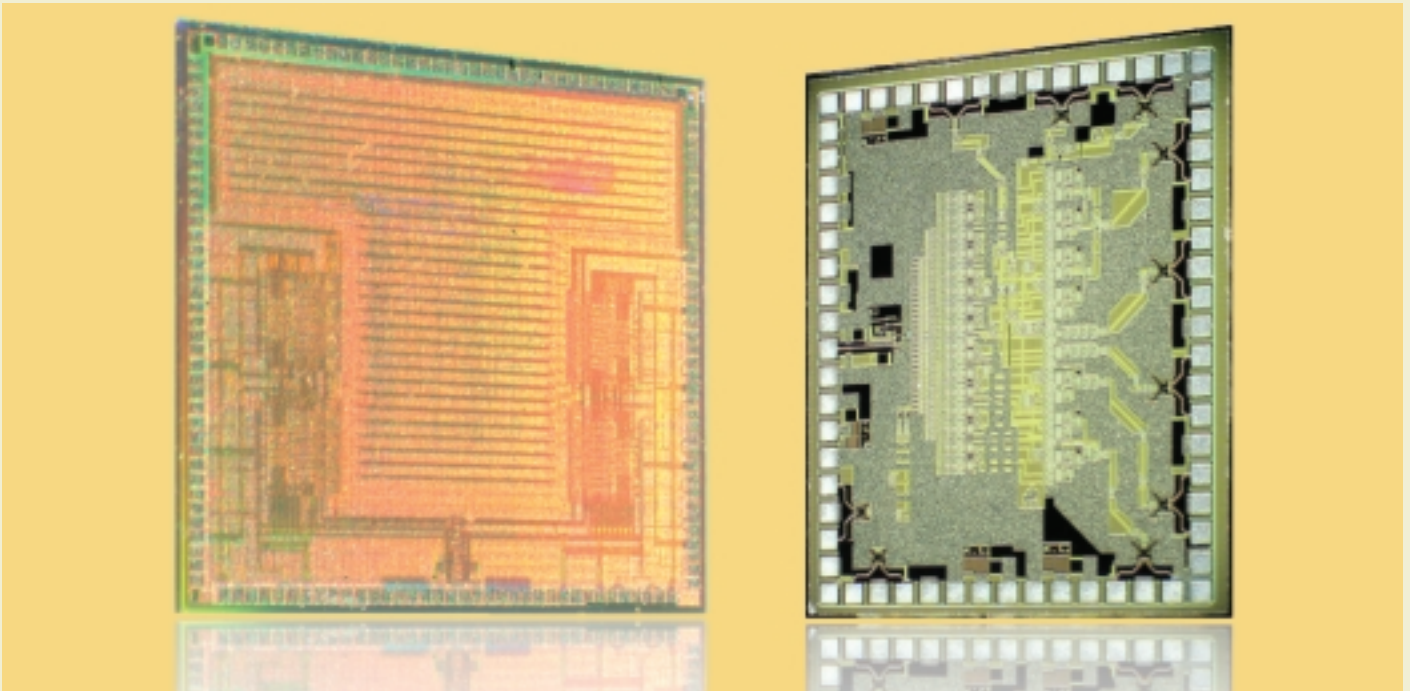


Abb.6: In Paderborn entwickelte Einzelkomponenten des digitalen Empfängers – Signalverarbeitungsbaustein in 130 nm CMOS-Technologie (links); 10GSPS-ADC in SiGe-Technologie.

Signalverarbeitung in der Form eines „T“ erkennen. Sie besteht aus 370 000 Logikgattern. Umgeben wird die Signalverarbeitung von den vier manuell erzeugten Demultiplexern für die hohen Geschwindigkeitsanforderungen. Dieser Schaltungsteil beinhaltet 12 000 einzelne Transistoren. Der gesamte Signalverarbeitungsbaustein besitzt eine Fläche von 15,74 mm<sup>2</sup>.

### **Aktuelle Forschungstrends**

Die Diskussion über den geplanten neuen 100 Gbit/s-Standard für das Ethernet-Protokoll hat auch das Interesse an kohärenter Übertragung mit höherstufigen Modulationsverfahren und Polarisationsmultiplex neu entfacht. Mit den erzielten Ergebnissen ist ein Übergang vom etablierten 10 Gbit/s-Standard auf 40 Gbit/s möglich, darüber hinaus werden verschiedene Formate der Quadratur-Amplituden-Modulation (QAM) diskutiert. Diese Formate lassen sich wie QPSK als Punktmuster im Konstellationsdiagramm darstellen, jedoch mit mehr Punkten und entsprechend höherem Informationsgehalt. Die eigentliche Symbol-Übertragungsrate kann man aus physikalischen Gründen nicht oder nur unwesentlich erhöhen: Dispersionseffekte, die bei 10 Gbit/s noch vernachlässigt werden können, würden die Signalqualität drastisch verschlechtern.

Einen alternativen Ansatz zum kohärenten Empfang von QPSK und QAM stellt das Orthogonale Frequenz-Multiplex (OFDM) dar. Dabei wird die gesendete Information senderseitig in ein Frequenzgemisch umgewandelt, sodass das übertragene Signal einem Rauschen ähnelt und das verfügbare Spektrum gleichmäßig ausfüllt. Im Empfänger muss dabei allerdings eine schnelle und genaue Rückübersetzung mit hohem mathematischem Aufwand erfolgen.

### **Zusammenfassung und Ausblick**

Bei den erfolgreichen Übertragungsexperimenten, die nun durch die Verleihung des Innovationspreises gewürdigt wurden, spielten vor allem drei Paderborner Eigenentwicklungen eine Rolle: die schnellen Analog-Digital-Umsetzer, das neuartige Phasenschätzverfahren und die schnelle Polarisationsregelung. Während sich für die als separate Komponente entwickelten Analog-Digital-Umsetzer mittlerweile kommerzielle Interessenten gefunden haben, liegt die Bedeutung der ebenfalls als Hardwarekomponente vorliegenden Verarbeitungsalgorithmen vor allem darin, als Prototyp für die kommerzielle Weiterentwicklung zu dienen und zugleich Ausgangsbasis für neue Forschungen mit den QPSK-verwandten QAM-Verfahren zu sein. Bei der Entwicklung von Komponenten für den neuen 100 Gbit/s-Standard könnte die Universität Paderborn wieder eine führende Rolle spielen.

### **Literatur**

R. NOÉ, PHASE NOISE TOLERANT SYNCHRONOUS QPSK/BPSK BASEBAND-TYPE INTRADYNE RECEIVER CONCEPT WITH FEED-FORWARD CARRIER RECOVERY, IEEE J. LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 23, 2005, PP. 802-808.

R. NOÉ, U. RÜCKERT, Y. ACHIAM, F. J. TEGUDE, H. PORTE, EUROPEAN SYNQPSK PROJECT: TOWARD SYNCHRONOUS OPTICAL QUADRATURE PHASE SHIFT KEYING WITH DFB LASERS, CTHC4, COHERENT OPTICAL TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS (COTA) TOPICAL MEETING, OSA, WHISTLER, BC, CANADA, JUNE 28-30, 2006.

S. HOFFMANN, T. PFAU, O. ADAMCZYK, R. PEVELING, M. PORRMANN, R. NOÉ, HARDWARE-EFFICIENT AND PHASE NOISE TOLE-

RANT DIGITAL SYNCHRONOUS QPSK RECEIVER CONCEPT, CTHC6, COHERENT OPTICAL TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS (COTA) TOPICAL MEETING, OSA, WHISTLER, BC, CANADA, JUNE 28-30, 2006.

T. PFAU, S. HOFFMANN, R. PEVELING, S. BHANDARE, S. K. IBRAHIM, O. ADAMCZYK, M. PORRMANN, R. NOÉ, Y. ACHIAM, FIRST REAL-TIME DATA RECOVERY FOR SYNCHRONOUS QPSK TRANSMISSION WITH STANDARD DFB LASERS, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 18, 2006, PP. 1907-1909.

T. PFAU, R. PEVELING, F. SAMSON, J. ROMOTH, S. HOFFMANN, S. BHANDARE, S. IBRAHIM, D. SANDEL, O. ADAMCZYK, M. PORRMANN, R. NOÉ, J. HAUDEN, N. GROSSARD, H. PORTE, D. SCHLIEDER, A. KOSLOVSKY, Y. BENARUSH, Y. ACHIAM, POLARIZATION-MULTIPLEXED 2.8 GBIT/S SYNCHRONOUS QPSK TRANSMISSION WITH REAL-TIME DIGITAL POLARIZATION TRACKING, PROC. ECOC 2007, BERLIN, 8.3.3, SEPTEMBER 16-20, 2007.

M. EL-DARAWY, T. PFAU, C. WÖRDEHOFF, B. KOCH, S. HOFFMANN, R. PEVELING, M. PORRMANN, R. NOÉ, REALTIME 40 KRAD/S POLARIZATION TRACKING WITH 6 dB PDL IN DIGITAL SYNCHRONOUS POLARIZATION-MULTIPLEXED QPSK RECEIVER, IN PROC. ECOC 2008, BRUSSELS, BELGIUM, WE.3.E.4, SEPT. 21-25, 2008.

O. ADAMCZYK, R. NOÉ, 13 GSAMPLES/S 5-BIT ANALOGUE-TO-DIGITAL CONVERTER FOR COHERENT OPTICAL QPSK RECEIVER, ELECTRONIC LETTERS, 44(15): 895-896, 2008.

S. HOFFMANN, R. PEVELING, T. PFAU, O. ADAMCZYK, R. EICKHOFF, R. NOÉ, MULTIPLIER-FREE REALTIME PHASE TRACKING FOR COHERENT QPSK RECEIVERS, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, VOL. 21, 2009, PP. 137-139.

V. HERATH, R. PEVELING, T. PFAU, O. ADAMCZYK, S. HOFFMANN, CH. WÖRDEHOFF, M. PORRMANN, R. NOÉ, CHIPSET FOR A COHERENT POLARIZATION-MULTIPLEXED QPSK RECEIVER, PROC. OFC/NFOEC 2009, SAN DIEGO, CA, USA, MARCH 22-26, 2009, OThE2.

T. PFAU, S. HOFFMANN, R. NOÉ, HARDWARE-EFFICIENT COHERENT DIGITAL RECEIVER CONCEPT WITH FEEDFORWARD CARRIER RECOVERY FOR M-QAM CONSTELLATIONS, IEEE JOURNAL OF LIGHTWAVE TECHNOLOGY, VOL. 27, NO. 8, APRIL 15., 2009.

#### Kontakt

**Prof. Dr.-Ing. Reinhold Noe**

**Optische Nachrichtentechnik und Hochfrequenztechnik**

**05251 60-5823**

**noe@upb.de**

#### Kontakt

**Prof. Dr.-Ing. Ulrich Rückert**

**Heinz Nixdorf Institut**

**05251 60-6346**

**rueckert@hni.upb.de**

**Jetzt: CITEC Exzellenzcluster**

**Kognitronik und Sensorik**

**Universität Bielefeld**

**0521 10 6120 50**

**rueckert@cit-ec.uni-bielefeld.de**