



# Integrierte optoelektronische Crossbar-Architekturen in planar-integrierter Freiraumoptik

Integrated Optoelectronic Crossbar Architectures in Planar Integrated Free-Space Optics

Stefan Sinzinger, Technische Universität Ilmenau,  
Qing Cao, Matthias Gruber, Jürgen Jahns, Fernuniversität Hagen

**Zusammenfassung** Crossbar-Architekturen oder Kreuzschienenverteiler finden Anwendung in Vermittlungssystemen und Rechnerarchitekturen. In ihnen werden  $N$  Eingänge über eine 2D-Schaltmatrix mit  $M$  Ausgängen verknüpft. Für zunehmende Kanalzahlen ergeben sich Anforderungen an die Anzahl der erforderlichen Verbindungen, die eine 3D-Verbindungstechnologie auf der Grundlage der Freiraumoptik interessant erscheinen lassen. In diesen Fällen ist eine kompakte Realisierung erforderlich. Mit Hilfe der planar-integrierten Freiraumoptik können sehr kompakte und stabile Systeme aufgebaut werden. In diesem Artikel werden unterschiedliche optoelektronische Crossbar-Verbindungssysteme, welche auf dieser Technologie beruhen, anhand experimenteller Ergebnisse beschrieben.

▶▶▶ **Summary** Crossbar interconnects have applications in routing systems for telecommunication as well as in computer architectures. They provide interconnections between  $N$  input channels and  $M$  output channels which are controlled through a 2D switching matrix. The necessary fan-in and fan-out operations as well as the scaling behaviour for an increasing number of input channels cause the interest in 3D free-space optical interconnects for the realisation of such crossbar switches. Planar-optics combines the advantages of the 3D nature of free-space optics with the compactness and robustness of integrated systems. We describe various optoelectronic crossbar switches which have been realised in planar optics.

**KEYWORDS** Mikrooptik, Mikrooptische Systeme, Planare Optik, Kreuzschienenverteiler, Crossbar

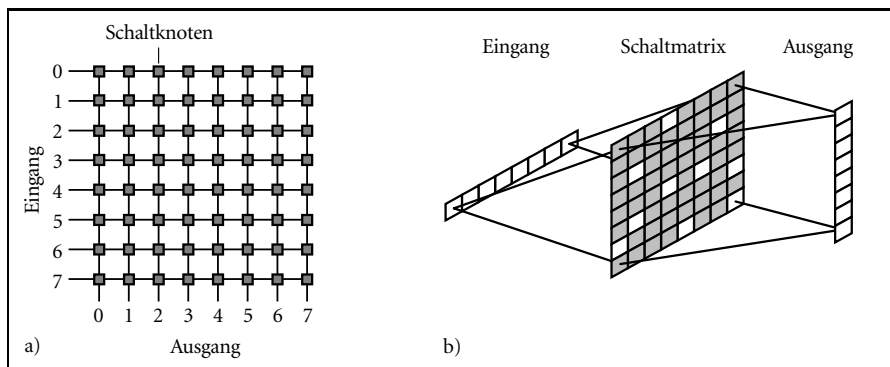
## 1 Einleitung

Crossbar-Architekturen sind aus der Kommunikationstechnik bekannte Verbindungsstrukturen. Dabei werden  $N$  Eingangskanäle über eine Schaltmatrix mit  $M$  Ausgangskanälen verbunden. Eine beliebige Verschaltung der Eingänge auf die Ausgänge ist über eine Matrix aus  $N \times M$  Schaltknoten realisierbar. Durch Setzen der einzelnen Schaltknoten ist jede beliebige Verbindung in einem einzigen Schritt realisierbar (Bild 1). Dies steht im Gegensatz zu mehrstufigen, so genannten *Multi-*

*stage-Netzwerken*, bei denen Verbindungen über mehrere Schaltstufen realisiert werden. Dadurch sind beliebige Verschaltungen der Kanäle mit insgesamt weniger Schaltknoten realisierbar; in der Regel reichen  $\log N$  Stufen mit je  $M$  Knoten aus. In Bild 1 ist dagegen erkennbar, dass ein Crossbar-Verbindungsmodul für dieselbe Aufgabe  $N \times M$  Schaltelemente benötigt. Dies bedeutet, dass die Realisierung von Kreuzschienenverteiler gerade für große Kanalzahlen einen hohen Hardwareaufwand mit sich bringt. Außerdem ist

die notwendige Verbindungsstruktur in Kreuzschienenverteiler deutlich komplexer und für große Kanalzahlen mit herkömmlicher elektronischer Verbindungstechnik nicht mehr realisierbar. In der Kommunikationstechnik werden daher bisher meist Multistage- oder Crossbar-Netze mit kleinen Kanalzahlen eingesetzt, die mit geringem Hardwareaufwand realisierbar sind [1; 2].

Für den Einsatz in Rechnersystemen sind die Anforderungen an die Verbindungsstrukturen meist etwas anders. Hier steht vor allem



**Bild 1** Verbindungsschema eines Kreuzschienenverteilers; **(a)** zweidimensionale Verbindungsstruktur; **(b)** Realisierung mit einer dreidimensionalen Verbindungstechnologie (z. B. Freiraumoptik).

die Schaltgeschwindigkeit im Vordergrund, d. h. es kommt darauf an, das entsprechende Verbindungsmuster mit möglichst hoher Geschwindigkeit umzusetzen und die Daten auf möglichst kurzem Wege, d. h. mit geringer Latenz, an das jeweilige Ziel zu bringen. In dieser Hinsicht bieten Crossbar-Architekturen Vorteile, da nur eine der in der Regel zeitaufwändigen Schaltstufen durchlaufen werden muss und die Beschaltung der Knoten (welche müssen „an“ sein, welche „aus“) wesentlich einfacher ist. Ein weiterer Vorteil ergibt sich dadurch, dass immer alle gewünschten Verbindungen gleichzeitig realisiert werden können, dass also eine bereits bestehende Verbindung keine Blockierung verursachen kann (*strictly non-blocking*). Für die Realisierung der komplexen Verbindungsstruktur bei großer Kanalzahl eignet sich eine dreidimensionale Konfiguration, die mit einer Verbindungstechnik auf der Basis von Freiraumoptik am besten umsetzbar ist [3]. Die ersten Vorschläge für eine Realisierung von Kreuzschienenverbindungen mit Hilfe von Freiraumoptik stammen bereits aus dem Ende der 1970er Jahre (Bild 1b). Goodman et al. [4] verwendeten anamorphotische Optik, um den Fan-out des optischen Eingangsvektors auf eine zweidimensionale Schaltmatrix zu realisieren. In gleicher Weise erfolgte hinter der Schaltmatrix eine Fan-in-Operation über eine anamorphotische Abbildung auf den Ausgangsvektor.

In den vergangenen Jahrzehnten haben sich die technologischen Möglichkeiten zur Herstellung mikrooptischer Bauelemente und Systeme sowie optoelektronischer Schaltmatrizen rasant weiter entwickelt. Mit Hilfe von planar-integrierter Freiraumoptik ist es möglich, sehr kompakte optische Systeme herzustellen, die entsprechende optische Verbindungen realisieren [5]. In diesem Artikel werden zwei mögliche Konfigurationen für planar-integrierte Crossbar-Architekturen diskutiert. Zunächst wird ein experimentell realisiertes System vorgestellt, das 10 Eingangskanäle als eindimensionalen Eingangsvektor mit einem entsprechenden Ausgangsvektor verbindet. Insbesondere für die planare Integration kann es vorteilhaft sein, die Eingangskanäle in einer zweidimensionalen Matrix anzuordnen. Einige Aspekte einer solchen 2D-Crossbar-Architektur werden in Abschnitt 3 untersucht. In Abschnitt 4 werden einige Schlussfolgerungen aus den Experimenten zu planar-integrierten Kreuzschienenverteiltern gezogen.

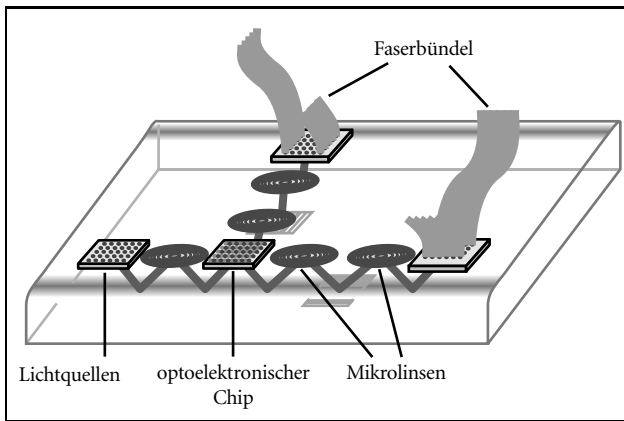
## 2 Vektor-Matrix-Multiplizierer mit 1D-Ein- und Ausgangsvektoren

Für die Anwendung in einem integrierten binären optoelektronischen Assoziativspeicher wurde eine Crossbar-Architektur realisiert [6]. Die mikrooptische Integration erfolgte nach dem Konzept der planaren Optik. Dazu wird der drei-

dimensionale Strahlengang des freiraumoptischen Systems so gefaltet, dass alle optischen Bauelemente in einer bzw. zwei Ebenen zu liegen kommen, welche mit den Oberflächen eines Glassubstrats zusammenfallen. Das optische System kann dann als Ganzes mit Hilfe lithographischer Oberflächenstrukturierung in einer Prozessfolge gefertigt werden [7]. Damit entfällt die mühsame nachträgliche Justierung der einzelnen Bauelemente mit Hilfe aufwändiger optomechanischer Komponenten. Die Positionierung der Systemkomponenten ist bereits mit der Herstellung der lithographischen Masken mit Submikrometer-Genauigkeit festgelegt. Auf diese Weise ist es möglich, sehr kompakte und stabile freiraumoptische Systeme zu realisieren. Dadurch, dass Signale durch die reflektiven optischen Komponenten stets im Inneren des Substrats gehalten werden, sind sie praktisch keinen störenden Umwelteinflüssen ausgesetzt, was planar-integrierte Systeme sehr robust macht. Abbildungsfehler, die aufgrund der schrägen Lichtausbreitung relativ zu den optischen Bauelementen entstehen, können durch optimierte optische Komponenten vermieden werden. Bild 2 zeigt schematisch ein Beispiel eines planar-integrierten optischen Systems.

Für die Realisierung der Crossbar-Verbindungsstruktur wurde im Wesentlichen der Goodman-Ansatz herangezogen und als planar-optisches System integriert. Eine Schemazeichnung eines Querschnitts des optoelektronischen Gesamtsystems in planarer Konfiguration ist in Bild 3 dargestellt [8]. Im Gegensatz zu Goodman, der den Fan-out mittels einer anamorphotischen Abbildung realisiert, wird hier zur Verbesserung der Lichteffizienz und zur Verringerung des Signalübersprechens ein beugungsoptisches Strahlteiler-element verwendet. Dieses ermöglicht es, die einfallende Intensität nahezu verlustfrei auf die diskreten Pixel der Schaltmatrix zu verteilen. Dem gegenüber erzeugt die

**Bild 2** Beispiel eines planar-optisch integrierten Systems mit hybrid integrierten optoelektronischen und faseroptischen Bauelementen. Ange deutet ist die schräge Lichtausbreitung auf einer Zick-Zack-Bahn zwischen den reflektionsbeschichteten Oberflächen.

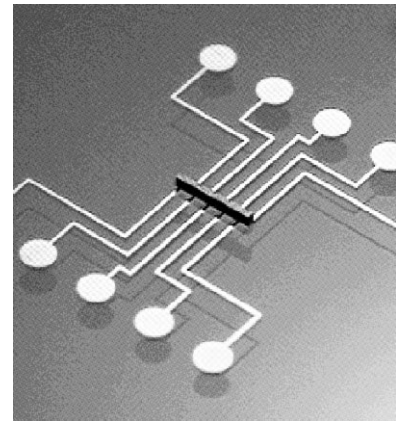


anamorphotische Abbildung eine Fokuslinie in der Ebene der Schaltmatrix, welche zwangsläufig auch Bereiche zwischen den Pixeln der Schaltmatrix beleuchtet und damit je nach gegebener Geometrie zu teils erheblichen Lichtverlusten führt. Im vorliegenden Fall erzeugt das Strahlteiler-element  $M = 10$  scharfe Fokus-punkte nahezu gleicher Intensität. Dabei ist die Funktion des optischen Beugungsgitters zusammen mit einer Linsenfunktion in einer einzigen mikrooptischen Komponente integriert. Als Kombi-Element erfüllt sie somit sowohl die strahlteilende als auch die abbildende Funktion.

Im Fan-in-Zweig des Vektor-Matrix-Multiplizierers kann ohne systematische Lichtverluste ein anamorphotisches Abbildungssystem eingesetzt werden. Dadurch werden die Signale in einem Kanal des Ausgangs-Arrays zusammengeführt, die durch eine Spalte der Schaltmatrix moduliert wurden. Zusätzlich zur

Kanalaufspaltung (Fan-out) bzw. Kanalzusammenführung (Fan-in) müssen die integrierten optischen Systeme vor und hinter der Schaltmatrix jeweils eine Anpassung des Kanalabstandes (Pitch) realisieren. Der Abstand der Kanäle im Eingangsvektor muss auf den Kanalabstand in der Schaltmatrix angepasst werden und dieser wiederum an den Kanalabstand im Ausgangsvektor. Dies wurde durch einen entsprechenden Abbildungsmaßstab in den einzelnen optischen Teilsystemen realisiert.

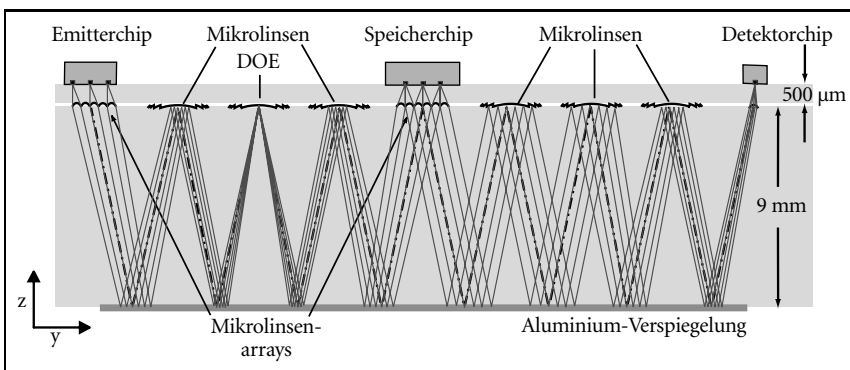
Das beschriebene System wurde in einem Glassubstrat von 9 mm Dicke realisiert. Alle optischen Komponenten wurden mit Hilfe lithographischer Verfahren als mehrstufige diffraktive optische Elemente (DOE) hergestellt. Zur Verspiegelung wurde in den entsprechenden Bereichen eine Aluminiumschicht aufgebracht. Die optoelektronischen Bauelemente wurden im



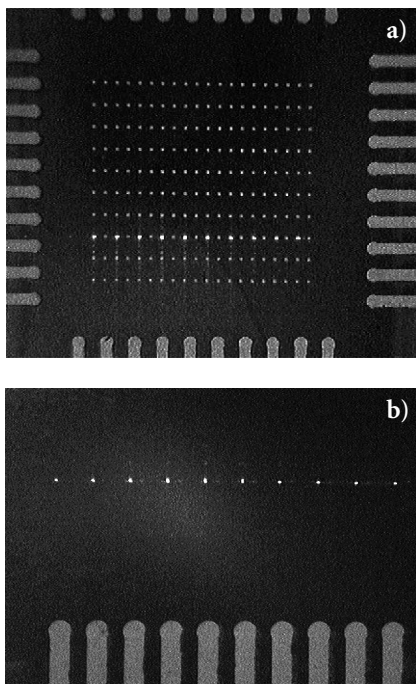
**Bild 4** Photographie eines Flip-Chip gebondeten Chips auf einem Glassubstrat mit integrierten Kontaktleitungen.

Flip-Chip-Verfahren auf ein zusätzliches Glassubstrat aufgebondet, das gleichzeitig den notwendigen Abstand zwischen Lichtquellen bzw. Detektoren und dem optischen Substrat sicherstellt. Auf dem zusätzlichen Substrat sind ferner die Leiterbahnen zur Kontaktierung der optoelektronischen Bauelemente integriert (Bild 4). Als Lichtquellen für den Eingangsvektor wurde eine Zeile aus oberflächenemittierenden Laserdioden (VCSELs) verwendet. Für die Schaltmatrix können Modulator-Arrays oder aktive optische Schaltelemente wie z. B. *Smart Pixel Arrays* auf der Basis von VCSELs eingesetzt werden.

Bild 5a zeigt die optischen Signale in der Ebene der Schaltmatrix für eine einzige eingeschaltete Diode der Laserdiodenzeile. Anstatt der nicht zufriedenstellend arbeitenden optoelektronischen Modulator-Matrix wurden hier Mikrospiegel in der entsprechenden Matrixanordnung integriert. Man erkennt die sehr gute Schärfe der Fokus-punkte und die gute Positioniergenauigkeit. Sie ist ein Indiz für eine quasi-verzeichnungsfreie Abbildung. Für die Fokus-punkte in der Matrixebene wurde experimentell eine Halbwertsbreite von ca.  $\delta x = 10,1 \mu\text{m}$  bestimmt. Entscheidend war hier, dass die Signale vollständig auf die Modulatorflächen fallen, deren Durchmesser  $20 \mu\text{m}$  betragen. Neben der Größe der Fokus-punkte



**Bild 3** Schemazeichnung eines Querschnittes durch das planar-integrierte Mikrosystem zur Realisierung einer Crossbar-Verbindungsstruktur.



**Bild 5** Optisches Signal im Falle einer eingeschalteten Eingangsdiode, aufgenommen in der Ebene der Schichtmatrix (oben) und in der Ausgangsebene des integrierten Kreuzschienenverteilers.

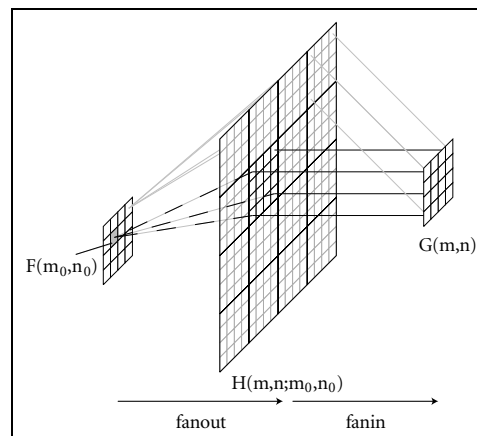
ist daher auch die Abbildungsqualität (Verzeichnungsfreiheit) von entscheidender Bedeutung.

In Bild 5b ist der mit dem entsprechenden Signal entstehende Ausgangsvektor dargestellt. Auch hier zeigt sich eine gute Abbildungsqualität, die dazu führt, dass die Detektorflächen sehr gut getroffen werden. Da die Abbildung in die Detektorebene mit Abbildungsmaßstab  $-2$  erfolgte, beträgt die Halbwertsbreite der Fokuspunkte dort ca.  $24,7 \mu\text{m}$ .

### 3 Crossbar-Architektur mit 2D-Ein- und Ausgangsvektoren

Aufgrund der eindimensionalen Anordnung der Kanäle in den Ein- und Ausgangsvektoren ergibt sich in der oben beschriebenen 1D-Konfiguration mit zunehmender Kanalzahl eine immer stärkere Asymmetrie in dem optischen System. Dies führt dazu, dass die im System zu realisierenden Ablenkwinkel in  $x$ - und  $y$ -Richtung stark unterschiedlich werden. Der technologische Aufwand bei der Realisierung integrierter mi-

**Bild 6** Verbindungsschema eines Kreuzschienenverteilers mit einer zweidimensionalen Verteilung der Eingangskanäle.



kroptischer Systeme ist im Wesentlichen bestimmt durch den maximal auftretenden Ablenkwinkel. Aus diesem Grunde ist die Möglichkeit interessant, anstatt der eindimensionalen Eingangsvektoren zweidimensionale Eingangsmatrizen zu verwenden [9]. Damit ergibt sich eine Verbindungsstruktur wie in Bild 6 dargestellt.

Die in Bild 6 skizzierte Konfiguration bietet eine große Flexibilität im Hinblick auf die Anordnung der Ein- und Ausgabekanäle. Damit kann beispielsweise für eine bestimmte technologische Implementierung eine möglichst gleichmäßige Verteilung der notwendigen Ablenkwinkel erzielt werden. Es besteht nicht die Notwendigkeit, quadratische Ein-/Ausgabefelder zu benutzen. Dies ist durch den gefalteten Strahlengang für eine planar-optische Realisierung nicht sinnvoll. Hier kommt man durch geometrische Überlegungen zu der Erkenntnis, dass eine rechteckförmige Verteilung der Eingangskanäle eine optimale Lösung darstellt [10]. Für die planar-optische Implementierung der Architektur nach Bild 6 sind im Wesentlichen die gleichen mikrooptischen Funktionselemente notwendig, die im Abschnitt 2 eingesetzt wurden. Der integrierte diffraktive Strahlteiler teilt die Eingangssignale nun jeweils in eine zweidimensionale Matrix auf. Aufgrund der Separierbarkeit der Aufgabe stellt dies keine Vergrößerung der Komplexität dar. Derzeit laufen Vorabexperimente zur Realisie-

rung des Fan-out-Zweiges einer solchen Crossbar-Architektur mit 2D-Eingabematrizen. Im Fan-in-Zweig kann wiederum mit Hilfe von Zylinderlinsen eine anamorphotische Abbildung der gesamten Schaltmatrix realisiert werden. Als Alternative besteht die Möglichkeit, mit Hilfe von Linsenarrays Abbildungssysteme parallel so zu optimieren, dass sich die Bilder in der Ausgangsebene überlagern.

Die Anordnung wie in Bild 6 mit  $N \times N$  Schaltknoten für  $N$  Eingänge (die hier quadratisch angeordnet sind) ergibt sich bei Verwendung binärer Schaltmatrizen. Eine ähnliche Anordnung wurde vor kurzem mit Schaltern kombiniert, welche mehrere Zustände einnehmen können. Als Schaltknoten wurden dabei mikromechanische Spiegel verwendet, bei denen der Kippwinkel über eine angelegte Spannung kontinuierlich verändert werden kann. Dies erlaubt es, die Anzahl der Spiegel (Schaltknoten) auf  $2N$  zu reduzieren, was die Anforderungen an den Entwurf des optischen Systems zum einen deutlich vermindert [11]. Andererseits sind solche Anordnungen, die von der strengen Crossbar-Architektur abweichen, weniger vielseitig bezüglich möglicher Schaltkonfigurationen; ein Broadcasting ist beispielsweise nicht möglich.

### 4 Zusammenfassung

Freiraumoptische Verbindungstechnik eignet sich in einzigartiger Weise für die Realisierung kom-

plexer Verbindungsstrukturen, wie sie z.B. für Crossbar-Architekturen notwendig sind. Mit Hilfe der planar-optischen Systemintegration ist es ferner möglich, freiraumoptische Systeme kompakt, stabil und kompatibel zu den aus der Elektronik bekannten Herstellungsverfahren zu fertigen. Wir haben dies am Beispiel integrierter optoelektronischer Crossbar-Verbindungen mit eindimensionalen Eingangsvektoren experimentell demonstriert. Die Verwendung einer zweidimensionalen Matrixanordnung der Ein- und Ausgangskanäle bietet Vorteile für die freiraumoptische Implementierung. Solche kompakten Systeme können als Module Anwendungen in der Verbindungstechnik, aber auch für Rechnerarchitekturen finden. Als ein Folgeprojekt der geschilderten Arbeiten wird derzeit in einer europaweiten Kooperation an der Realisierung eines optoelektronischen Bussystems zur Optimierung der Prozessor-Speicher-Kommunikation in Multiprozessorsystemen gearbeitet [12; 13]. Die zugrunde liegende Verbindungsstruktur basiert wiederum auf der Crossbar-Architektur.

**Literatur**

[1] J.E. Midwinter (ed.): Photonics in switching I and II, Academic Press, San Diego 1993.  
 [2] H. S. Hinton (ed.): An introduction to photonic switching fabrics, Plenum Press, New York 1993.  
 [3] J. Jahns, S. H. Lee: Optical Computing Hardware, Academic Press, San Diego, 1994.

[4] J.W. Goodman, A. R. Diaz, L.M. Woody: Fully parallel, high-speed incoherent optical method for performing discrete Fourier transforms, Opt. Lett. 2 (1978) 1.  
 [5] J. Jahns: Planar packaging of free-space optical interconnections, IEEE Proc. 82 (1978) 1623.  
 [6] D. Fey, W. Erhardt, M. Gruber, J. Jahns, H. Bartelt, G. Grimm, L. Hoppe, S. Sinzinger: Optical interconnects for neural and reconfigurable VLSI architectures, IEEE Proc. 88 (2000).  
 [7] S. Sinzinger, J. Jahns: Microoptics (2nd expanded edition), Wiley-VCH Verlag Weinheim (2003).  
 [8] M. Gruber, J. Jahns, S. Sinzinger: Planar-integrated optical vector matrix multiplier, Appl. Opt. 39 (2000) 5367.  
 [9] J. Jahns: Free-space optical digital computing and interconnection, in: Progress in Optics XXXVIII, E. Wolf (ed.), Elsevier, Amsterdam, 1998, pp. 419–513.  
 [10] S. Sinzinger, J. Jahns: Integrated microoptical imaging system with high interconnection capacity fabricated in planar optics, Appl. Opt. 36 (1997) 4729.  
 [11] T. Neilson et al.: „Fully provisioned 112x112 micro-mechanical optical crossconnect with 35.8 Tb/s demonstrated capacity“, OFC 2000, paper PD-12.  
 [12] P. Lukowicz, S. Sinzinger, K. Dunkel, H.-D. Bauer: Design of an optoelectronic VLSI/parallel fiber bus, J. Pure Appl. Opt. 1 (1999) 367.  
 [13] M. Gruber, E. Eljoudi, J. Jahns, S. Sinzinger: Practical realization of massively parallel fiber-free-space optical interconnects, Appl. Opt. 40 (2001) 2902.



**1 Prof. Dr. Stefan Sinzinger** ist seit Juni 2002 Professor im Fachgebiet Technische Optik in der Fakultät für Maschinenbau an der TU Ilmenau. Sein Arbeitsgebiet ist der Einsatz von Mikrooptik zur Optimierung und Integration von freiraumoptischen Systemen.  
 Adresse: Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Technische Optik, PF 100565, D-98684 Ilmenau. E-Mail: stefan.sinzinger@tu-ilmenau.de

**2 Dr. Qing Cao** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Optische Nachrichtentechnik der FernUniversität Hagen. Seine Arbeitsgebiete sind die optische Verbindungstechnik und die diffraktive Optik.

**3 Matthias Gruber** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Optische Nachrichtentechnik der FernUniversität Hagen. Sein Arbeitsgebiet umfasst die Optimierung mikro-optischer Komponenten und Systeme sowie die planare Integration mikro-opto-elektromechanischer Systeme.

**4 Prof. Dr. Jürgen Jahns** ist Professor für Optische Nachrichtentechnik an der FernUniversität Hagen. Seine Arbeitsgebiete sind die mikrooptische Integration und die Anwendung der Optik in der Rechentechnik.  
 Adresse: Fernuniversität Hagen, Optische Nachrichtentechnik, Universitätsstr. 27/PRG, D-58084 Hagen. E-Mail: jahns@fernuni-hagen.de