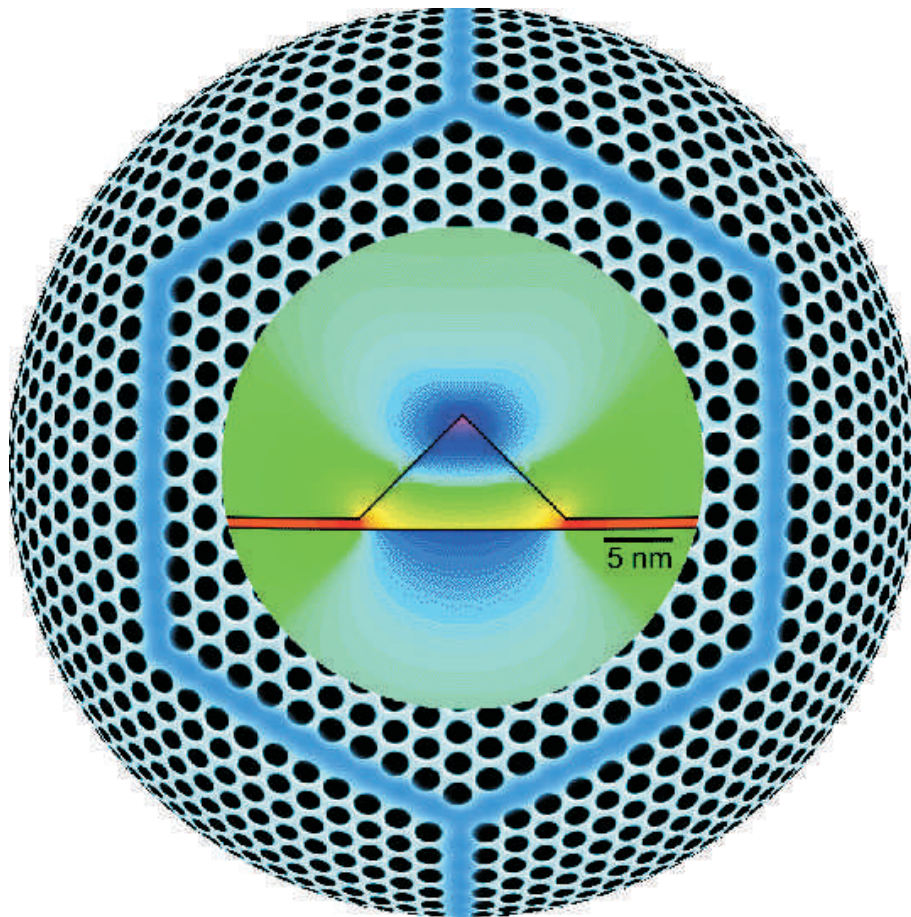


*Nan*Op

Kompetenzzentrum



Nanostrukturen für
die Optoelektronik

Vorwort

Nanotechnologie ist einer der wichtigsten wissenschaftlichen Begriffe für das beginnende einundzwanzigste Jahrhundert. Nanotechnologie tritt als eine "positive Hochtechnologie" auf und steht für die Zukunft. Der Begriff bezeichnet eine Vielfalt von Erscheinungen aus der Physik, der Chemie, der Biochemie, der Materialwissenschaften und der Elektronik.

Diese Broschüre beleuchtet eines der wichtigsten Teilgebiete der Nanotechnologie, nämlich das der *Nanostrukturen in der Optoelektronik*. Dies ist das Gebiet des Kompetenzzentrums *NanOp*. Wir wollen Ihnen zeigen, welche Bedeutung Nanotechnologie für die zukünftige Optoelektronik besitzt, wohin der Weg unserer Arbeit führt und wie sich Ergebnisse auf die Wirtschaft, die Gesellschaft und auf jeden einzelnen von uns auswirken könnten.

Inhalt

Die Nanotechnologie-Kompetenzzentren des BMB+F	3
Das Kompetenzzentrum NanOp	3
Die Aufgaben von NanOp in der Forschung	4
Die Aufgaben von NanOp in Bildung und Öffentlichkeitsarbeit	5
Die Aufgaben von NanOp in der Wirtschaft	6
Die Forschungsprojekte von NanOp	6
Blaugrüne Lichtemitter	7
Vertikallaserdioden für den Spektralbereich 650 bis 850 nm	9
Vertikal emittierende Laserdioden für 1,3 μm Wellenlänge auf Galliumarsenid-Basis	11
Nanostrukturierte Halbleiterlaser und Wellenleiter für den Spektralbereich 1,5 μm	12
Hochleistungs-Quantenpunkt-Laserdioden	13
Zur Finanzierung	15
Bedeutung der Nanotechnologie in der Optoelektronik	16
Ausblicke und Visionen	20
Wirtschaftliche Aspekte	23
Mitglieder von NanOp	26
Literatur	28
Kontakt	28
Impressum	28
Anhang: Bilder	29

Die Nanotechnologie-Kompetenzzentren des BMB+F

Am 12. August 1998 fiel die Entscheidung im Nanotechnologie-Kompetenzzentrenwettbewerb des Bundesministeriums für Bildung und Forschung. Die Sieger sind sechs Kompetenzzentren aus allen Bereichen der Nanotechnologie. Sie fassen über die gesamte Bundesrepublik verteilte, herausragende Forschungsgruppen, Firmen und Banken zusammen und ermöglichen gemeinsame Arbeiten für eine anwendungsnahe Nanotechnologieforschung. Diese Arbeiten sollen die internationale Spitzenstellung, die die Bundesrepublik Deutschland in vielen Feldern der Nanotechnologie innehat, sichern, ausbauen und wirtschaftlich nutzbar machen. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten werden vom BMB+F bis voraussichtlich 2003 mit etwa 200 Millionen DM gefördert.

Das Kompetenzzentrum *NanOp*

Einer der sechs Gewinner ist das von der TU Berlin koordinierte Kompetenzzentrum *NanOp* zur Erforschung der Anwendung von Nanostrukturen in der Optoelektronik. Es hat sich zum Ziel gesetzt, die Forschung und Entwicklung optoelektronischer Bauelemente und Systeme basierend auf Nanotechnologie voranzutreiben. *NanOp* ist ein Zusammenschluß von 31 Universitäten, Forschungsinstituten und Firmen, die auf den Gebieten Nanotechnologie bzw. Optoelektronik eine national und international herausragende Stellung einnehmen und bereits außerordentliche Leistungen vorweisen können. Außerdem gehören zwei große Banken dazu, die sich mit Know-How-Transfer und risikokapitalfinanzierten Firmengründungen befassen. Durch die Auswahl der teilnehmenden Institutionen ist eine einzigartige Kombination gelungen von grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung mit dem wirtschaftlichen Potential und der Erfahrungsbasis von führenden Industrieunternehmen. Im Kompetenzzentrum sind sowohl etablierte Großfirmen als auch hochinnovative, kleine Technologiefirmen vertreten.

Die Aufgaben von *NanOp* in der Forschung

NanOp soll die Entwicklung neuer Technologien beschleunigen und gleichzeitig durch eine enge Zusammenarbeit mit Firmen eine rasche Umsetzung dieser Entwicklungen in marktreife Produkte gewährleisten. Dafür nimmt das Kompetenzzentrum folgende Aufgaben wahr:

- **Planung:** Auf regelmäßigen Sitzungen eines unabhängigen, internationalen Expertengremiums - des *NanOp-Steering Committee* - werden aktuelle Trends in der Forschung untersucht, Chancen für neue Produkte abgeschätzt und schließlich Empfehlungen für die Richtung der Forschungsarbeit innerhalb von *NanOp* gegeben.
- **Koordination:** Auf Plenarsitzungen der Mitglieder werden zu den Richtungsempfehlungen passende Projektvorschläge erarbeitet und Projektgruppen gebildet, jedes Projekt steht jedem Mitglied offen. Die Projektgruppen definieren sich für ihr Projekt Zielvorgaben und Zeitpläne (Meilensteine und Roadmaps).
- **Beratung und Abstimmung:** Das Kompetenzzentrum berät die Projektgruppen bei Ihrer Planungsarbeit und unterstützt die Erarbeitung von Anträgen auf Förderung.
- **Beratung / Bewertung:** Laufende Projekte werden vom Kompetenzzentrum begleitet und beraten. Dies soll sicherstellen, daß eventuell auftretende Probleme frühzeitig identifiziert und gelöst werden können, und daß auf ökonomische Entwicklungen und aktuelle Trends in der Forschung schnell reagiert werden kann.

Eine wichtige Grundlage für die enge Zusammenarbeit zwischen Forschung, Entwicklung und Produktion ist eine klar anwendungs- und produktorientierte Forschung an den Universitäten und Instituten. Bereits zu Beginn eines *NanOp*-Projektes werden die späteren Industriepartner benannt und Rahmenvorgaben für den zeitlichen Ablauf festgelegt. Dabei werden auch klar definierte Schnittstellen für die Übergabe der Arbeit von einem Projektpartner zum nächsten geschaffen, gleichzeitig erleichtert ein bereits ab dem Vorfeld stattfindender Know-How-Austausch diesen Übergang. Im gesamten Ablauf spielen moderne Kommunikationsmittel wie E-mail, Inter- und Intranet zentrale Rollen.

Die Aufgaben von *NanOp* in Bildung und Öffentlichkeitsarbeit

Die Nanotechnologie wird viele Bereiche von Technik und Wissenschaft verändern. Eine weitere Aufgabe der Kompetenzzentren ist daher, Aus- und Weiterbildungsveranstaltungen durchzuführen und Bildungseinrichtungen zu beraten.

Das Kompetenzzentrum *NanOp* hat bereits verschiedene Weiterbildungsveranstaltungen für Wissenschaftler organisiert. Mitglieder des Kompetenzzentrums sind unter anderem an der TU Berlin und der Universität Würzburg mit der Planung und Einrichtung von neuen Studiengängen mit dem Schwerpunkt Nanotechnologie beschäftigt. Ein weiteres Arbeitsfeld ist die Organisation und Betreuung eines nationalen und internationalen Wissenschaftlertauschs, sei es im Rahmen von Gastaufenthalten oder von internationalen Symposien. *NanOp* betreut zur Zeit unter anderem russische Wissenschaftler aus dem Ioffe-Institut der Russischen Akademie der Wissenschaften in St. Petersburg, die in Deutschland arbeiten, und bereitet zusammen mit dem Japanisch-Deutschen Zentrum in Berlin Treffen zwischen Wissenschaftlern aus Japan und Deutschland vor.

Unter Bildung im weiteren Sinn fällt auch die Öffentlichkeitsarbeit. Aufgabe der Kompetenzzentren ist es, ein breites Publikum über die Nanotechnologie zu informieren und deren Bedeutung für die Zukunft darzustellen. *NanOp* ist auf diesem Sektor vor allem durch Informationsangebote im Internet und durch die Beteiligung an verschiedenen Ausstellungen und Messen tätig. Journalisten finden bei *NanOp* die Anlaufstelle für Recherchen zum Themenkomplex *Nanotechnologie und Optoelektronik* und können von hier aus an kompetente Gesprächspartner vermittelt werden. Davon zeugen in den vergangenen fünfzehn Monaten mehr als 60 Artikel in regionalen, überregionalen und internationalen Zeitschriften sowie mehrere Fernsehbeiträge, die mit fachlicher Unterstützung von *NanOp* produziert wurden.

Die Aufgaben von *NanOp* in der Wirtschaft

Der Grundgedanke bei der Einrichtung der Kompetenzzentren ist, den wissenschaftlichen und technologischen Vorsprung in Deutschland wirtschaftlich zu nutzen. Daher ist eine der wichtigsten Aufgaben der Kompetenzzentren die enge Zusammenarbeit mit der Industrie. Hierunter fällt die Zielbestimmung und die Koordination der Forschung und die frühzeitige Einbindung der Industrie in den gesamten Entwicklungsprozeß. Darüber hinaus sind aber noch weitere wichtige Aufgaben zu erfüllen. Die übergeordnete Erhebung und Analyse von Wirtschaftsdaten soll helfen, vor allem die Entwicklungsarbeit für Bauelemente und Systeme marktorientiert durchzuführen. Um eine schnelle Vermarktung von Ergebnissen zu gewährleisten, sollen die Kompetenzzentren die Gründung von technologieorientierten Unternehmen anregen und durch Beratungstätigkeit und die Vermittlung von Risikokapitalgebern unterstützen. So haben beispielsweise im Umfeld von *NanOp* bereits zwei Firmengründungen in Berlin und Würzburg stattgefunden. Aber nicht nur Ausgründungen sollen unterstützt werden. Die Kompetenzzentren sollen in den nächsten fünf Jahren weitere Kapitalgeber finden, so daß ihre weitere Existenz auch ohne Finanzierung durch das BMB+F gewährleistet ist.

Eine weitere Aufgabe der Kompetenzzentren liegt in der Unterstützung von Patentanträgen und in der Mitarbeit in Normungs- und Standardisierungsgremien.

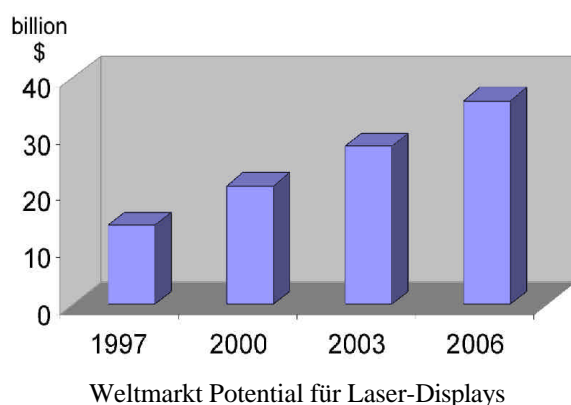
Die Forschungsprojekte von *NanOp*

Das Konzept der Kompetenzzentren sieht eine projektorientierte Förderung vor. *NanOp* startet mit fünf beantragten und zur Förderung vorgeschlagenen Projekten. Diese Projekte stellen wir Ihnen auf den nächsten Seiten vor.

Blaugrüne Lichtemitter

"Klassische" Halbleiter-Laserdioden arbeiten im infraroten oder im sichtbaren roten Spektralbereich. Seit kurzem sind auch Laserdioden im violetten bis ultravioletten Spektralbereich verfügbar, der Spektralbereich von blau über grün bis gelb kann aber bisher nicht abgedeckt werden. Die Herstellung solcher Laser wird aber durch die Ausnutzung quantenmechanischer Effekte in Halbleiter-Quantenpunkten möglich. Hierfür müssen geeignete Herstellungsverfahren gefunden und optimiert werden. Die Herstellungsprozesse für vollständige Laser müssen an die Erfordernisse der Industrie angepaßt und in den industriellen Maßstab übertragen werden. Gleichzeitig gilt es, geeignete Bauformen von Lasern zu entwickeln und, basierend auf den neuen Bauelementen, Anwendungen zu entwickeln.

Die Erschließung des blauen und grünen Spektralbereiches ermöglicht beispielsweise die Verwendung von preiswerten Halbleiterlasern in der Laser-Projektionstechnik. Die von der Firma Laser-Display-Technologien LDT aus Gera vorgestellte Technik des



[Quelle: 1997 - 2003 Stanford Res., 2006 Schätzung LDT]

Laserprojektionsfernsehens, die 1997 mit dem Zukunftspreis des Bundespräsidenten ausgezeichnet wurde, kann im Massenmarkt eingeführt werden, sobald preiswerte Laser für die Wellenlängen blau und grün verfügbar sind. Damit wird die Ablösung der hundert Jahre alten Bildröhre im Bereich des Fernsehens möglich.

Neben diesem im wörtlichen Sinne spektakulären Anwendungsfeld besteht aber auch Bedarf an blauen und grünen Lasern in anderen Bereichen:

- In der Computertechnik ermöglichen Laser kürzerer Wellenlänge eine höhere Speicherdichte auf optischen Datenspeichern (Nachfolge der Digital Versatile Disc - DVD).

- In der digitalen Drucktechnik und Fotobelichtertechnik können durch den Einsatz von Lasern mit kürzerer Wellenlänge schärfere und feiner aufgelöste Abbildungen erzeugt werden.
- In der Nachrichtentechnik sind grüne Laser für die optische Signalübertragung in Lichtleitern aus Kunststoff besonders interessant. Solche Plastic Optical Fibers (POFs) besitzen im grünen Spektralbereich ihre größte Transparenz. Sie sind besonders preiswert in der Herstellung und sind stabiler gegen mechanische Beanspruchungen als herkömmliche Glasfasern. Sie eignen sich daher besonders für den Einsatz in Fahrzeugen und Maschinen.
- In der Medizintechnik werden blaue und grüne Laser neue Diagnose- und Therapieverfahren ermöglichen.
- In der Umwelt- und der Sensorik können mit Hilfe dieser Laser neuartige Gasanalyse- und Schadstoff-Überwachungssysteme hergestellt werden.
- Blaue und grüne Leuchtdioden mit hoher Lichtleistung werden die Basis für neue Beleuchtungssysteme bilden. Bereits heute werden in der Fahrzeugtechnik Leuchtdioden in Armaturenbrettbeleuchtungen, Bremslichtern und Blinkern eingesetzt. Langfristig wird hier auch der Einsatz in stationären Systemen hinzukommen, der langfristig zu einem Ersatz von Glühbirne und Leuchtstoffröhre führen kann. Halbleiterlichtquellen bieten drei entscheidende Vorteile: sie sind klein, haben einen hohen Wirkungsgrad und produzieren praktisch keine Abwärme.

Vertikallaserdioden für den Spektralbereich 650 bis 850 nm

Vertikal emittierende Laserdioden - sogenannte VCSELs* - sind ein junges Konzept in der Halbleiter-Lasertechnik. Das Standardmodell des Halbleiterlasers ist der sogenannte "Kantenemitter". Dies ist eine Halbleiter-Schichtstruktur, die das Laserlicht parallel zum Schichtverlauf aus einer Kante aussendet (Abb. 1). Die Herstellung der Schichtstruktur erfolgt auf einem sog. Wafer und ist an sich vergleichsweise einfach.

Allerdings erfordert die Verarbeitung zum fertigen Laser weitere, relativ komplizierte Prozessschritte: Die Oberfläche des Wafers muß geeignet strukturiert werden, der Wafer muß in die einzelnen, nur wenige Millimeter

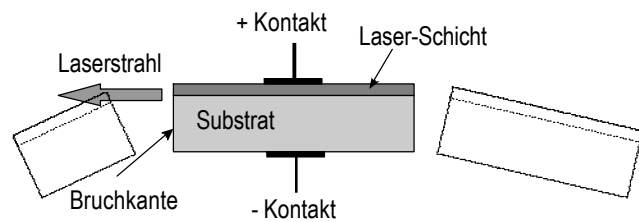


Abb. 1: Schematischer Aufbau eines Kantenemitters

bis Millimeterbruchteile großen Laser gespalten werden, die Bruchkanten, aus denen später das Laserlicht ausgesendet wird, müssen nachbearbeitet und ggf. beschichtet werden, und Stromzuführungen müssen auf Ober- und Unterseite angeschlossen werden etc. Diese Arbeitsschritte sind aufwendig, da sie die *serielle* Verarbeitung vieler kleiner Halbleiterstücke erfordern.

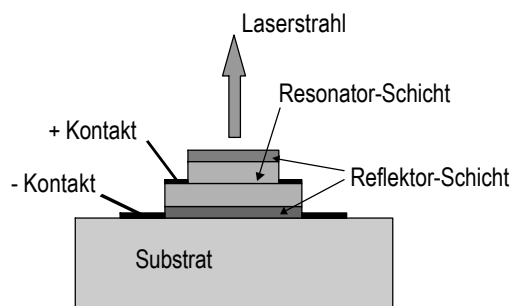


Abb. 2: Schematischer Aufbau eines VCSEL

VCSELs hingegen sind so aufgebaut, daß sie ihr Laserlicht senkrecht zur Oberfläche des Wafers aussenden (Abb. 2). Alle Verarbeitungsschritte zur Herstellung der fertigen Laser können auf dem vollständigen Wafer *parallel* erfolgen. Erst wenn die Laser fertig sind, wird der Wafer in die einzelnen Laser aufgespalten. Dieser Pro-

zeß ist, wenn er beherrscht wird, einfacher, schneller und billiger. Außerdem können leicht auch mehrere Laser auf einem Bauelement untergebracht werden - man braucht nur ein größeres Stück vom Wafer abzuspalten. Auch die Vereinigung der Laser mit elektronischen Schaltungen, wie z. B. Verstärkern oder Modulatoren ist damit einfach möglich.

* VCSEL - ausgesprochen wie "Wixel" - steht für *Vertical Cavity Surface Emitting Laser*.

Die Anwendungsmöglichkeiten und damit der Markt für VCSELs ist zur Zeit unüberschaubar groß. Eines der wichtigsten zukünftigen Anwendungsfelder ist die Vernetzung von Rechnern, Rechnerboards und Chips: die elektrische Übertragung digitaler Informationen zwischen einzelnen Chips im Computer ist in ihrer Geschwindigkeit begrenzt, schon heute ist die interne Datenübertragungsrate in einem Mikroprozessor etwa fünf mal höher als zwischen Prozessor und Peripherie. Je schneller die Übertragung wird, desto stärker wirken sich Störfaktoren wie elektrische Dämpfung und kapazitive Widerstände aus. Eine Lösung für dieses Problem ist die Übertragung der Information mit Licht. VCSELs sind in der Größe von wenigen Mikrometern herstellbar und so als Sender für eine solche optische *Inter-Chip-Kommunikation* geeignet.

Die Arbeiten von *NanOp* zielen darauf ab, dem VCSEL-Konzept durch die Benutzung von Nanostrukturen wie Quantenfilmen und Quantenpunkten zum Durchbruch zu verhelfen, so daß völlig neuartige VCSELs oder solche höherer Qualität bei gleichzeitig geringerem Stückpreis hergestellt werden können.

Vertikal emittierende Laserdioden für 1,3 μm Wellenlänge auf Galliumarsenid-Basis

Der Wellenlängenbereich 1,3 μm ist von großer Bedeutung für die optische Nachrichtentechnik: Glasfasern besitzen hier ihre geringste *Dispersion*, das bedeutet, daß bei dieser Wellenlänge die höchsten Datenübertragungsraten möglich sind. Die Laser, die heute für die Nachrichtenübertragung auf diesen Wellenlängen eingesetzt werden, sind Halbleiter-Laserdioden auf der Basis des Halbleiters Indiumphosphid (InP). Dieses Material ist sehr teuer und in der Industrie nicht weit verbreitet, da es nur für eine relativ kleine Sparte von Spezialanwendungen dient. Deshalb ist auch die Technologie der Herstellung und Bearbeitung im Vergleich zu anderen Materialsystemen wie Silizium oder Galliumarsenid relativ wenig fortgeschritten und teuer. Auf der anderen Seite ist es aber noch nicht gelungen, einen Ersatz für das teure InP zu finden. Erst Anfang 1999 gelang einer gemeinsamen Forschergruppe des Petersburger Ioffe-Instituts und der TU Berlin im Labormaßstab der Beweis dafür, daß die Nanotechnologie hier die Lösung sein kann: ein Halbleiter-Quantenpunkt-Laser, der auf dem Substratmaterial Galliumarsenid (GaAs) hergestellt wurde, strahlte bei 1,3 μm Wellenlänge. Damit könnte der Anfang für die Ablösung des InP im Bereich 1,3 μm - Laser gemacht worden sein. Das Ziel des Projektes ist aber sogar, vertikal emittierende Laser für 1,3 μm herzustellen, und geht damit noch einen Schritt weiter. Bisher gibt es solche Laser für diese Wellenlänge noch nicht zu kaufen. Sie haben aber ein großes Anwendungspotential in der Nachrichtentechnik und in der Computertechnik. Gerade für die Hochgeschwindigkeits-Datenübertragung auf kurzen und Mittleren Strecken (z. B. innerhalb von Computern und innerhalb von Gebäuden) können solche Laser eingesetzt werden. Der große Vorteil ist ihre kompakte Bauform, die gleichzeitig die Integration mehrerer Laser auf einem Chip ermöglicht. Dies ist die Voraussetzung für eine leistungsfähige und preiswerte parallele Datenübertragung.

Die geringen Kosten für einen 1,3 μm -Laser auf GaAs-Basis sind ein entscheidender Faktor für die Verbreitung der optischen Nachrichtentechnik. Dabei ist einer der größten Zukunftsmärkte die optische Verbindung von Rechnern, Rechnerboards und Chips gesehen.

Nanostrukturierte Halbleiterlaser und Wellenleiter für den Spektralbereich 1,5 μm

Neben der Wellenlänge 1,3 μm ist auch der Wellenlängenbereich um 1,55 μm ein wichtiger Bereich für die optische Nachrichtentechnik, denn bei 1,55 μm liegt das zweite "Fenster" von Glasfasern: der Bereich der geringsten optischen Dämpfung, also salopp der der höchsten "Transparenz", was vor allem für die Langstreckenübertragung von großer Bedeutung ist. In diesem *NanOp*-Projekt sollen Konzepte zur Integration optischer Bauelemente entwickelt werden. Ein Wellenleiter ist ein Lichtleiter wie die Glasfaser, der aber auf einem Halbleiterchip hergestellt wird. Er stellt damit das optische Gegenstück zur elektrischen Leiterbahn dar. Wellenleiter ermöglichen die optische Verbindung von auf einem gemeinsamen Chip hergestellten, optoelektronischen Bauelementen. Wichtige Anwendungen sind hier z. B. die Zusammenführung der Strahlen verschiedener Laser in einem optischen Strang, der dann in eine einzelne Glasfaser eingekoppelt werden kann. Neben der reinen Lichtführung können Wellenleiterstrukturen in Verbindung mit photonischen Kristallen aber auch dazu genutzt werden, hochwertige optische Elemente wie Spiegel, Filter, Beugungsgitter und Strahlteiler im Mikro- und Nanometermaßstab herzustellen. Damit wird es möglich, eine ganz neue Kategorie von Halbleiterbauelementen herzustellen, die nicht mehr nur elektrische Funktionen haben, sondern auch optische. In weiterer Zukunft können Kombinationen von Wellenleitern und photonischen Kristallen die Basis für rein optisch arbeitende Schaltungen sein und den Weg zum integrierten optischen Computer darstellen.

Integrierte elektronisch-optische Systeme, in denen Elektronik und Photonik vereint sind (Optically and Electronically Integrated Circuit - OEIC), sind vor allem in der optischen Nachrichtentechnik von großer Bedeutung. Der Aufbau optischer Vielkanal-Systeme, der bislang mechanisch sehr aufwendig, und damit teuer und stör anfällig war, wird deutlich vereinfacht. Die damit herstellbaren Systeme werden kleiner, stabiler und billiger werden, was eine wichtige Voraussetzung für einen flächendeckenden Ausbau der optischen Nachrichtenübertragung bis in den Haushalt der Endbenutzer hinein ist.

Hochleistungs-Quantenpunkt-Laserdioden

Hochleistungs-Laserdioden sind Halbleiterlaser mit einer Licht-Ausgangsleistung von mehreren hundert Milliwatt bis zu einigen zehn Watt. Solche Hochleistungslaser finden in der Technik zahlreiche Anwendungen, wie zum Beispiel in der Materialbearbeitung. Eine andere Möglichkeit ist die Nutzung als *Pump-Laser* für andere Laser. Hierbei werden Halbleiterlaser benutzt, um durch Ihr Licht einen zweiten Laser mit Energie zu versorgen. Dieser Vorgang wird *optisches Pumpen* genannt, er ist immer dann von Bedeutung, wenn ein Laser betrieben werden soll, der nicht durch elektrischen Strom mit Energie versorgt - sprich gepumpt - werden kann. Ein Beispiel für einen solchen Laser ist der Neodym-Granat-Laser, einer der allerersten Laser, der überhaupt hergestellt wurde. Bei diesem wird ein Yttrium-Aluminium-Granat-Kristall (YAG) durch starke Blitzlampen mit Energie versorgt und dadurch zur Laser-Emission angeregt. Um einen Laser optisch zu pumpen, sind sehr hohe Lichtleistungen erforderlich. Heute werden dafür in den meisten Fällen Diodenlaser anstelle von Blitzlampen benutzt. Diodenlaser haben den Vorteil, ihre gesamte Lichtleistung in einem schmalen Wellenlängenbereich zu liefern, der mit dem Absorptionsbereich des zu pumpenden Lasers abgestimmt wird, wodurch die Verluste sehr gering sind.

Ein anderes, wichtiges Beispiel für optisch gepumpte Laser sind Faserlaser. In diesen Lasern dient ein Stück einer speziell dotierten Glasfaser als Verstärkungsmedium. Da solche Glasfasern materialbedingt nicht mit elektrischem Strom angeregt werden können, bleibt hier das optische Pumpen die einzige Betriebsmöglichkeit. Glasfaserlaser haben eine sehr große Bedeutung in der Nachrichtentechnik, vor allem als Zwischenverstärker bei der Langstreckenübertragung. Eine weitere Eigenschaft von Faserlasern ist die Möglichkeit der *Frequenzkonversion*. Normalerweise hat das Licht, das ein optisch gepumpter Laser emittiert, immer eine größere Wellenlänge als das Pumplicht. Bei sehr hohen Pumpleistungen können aber *nichtlineare Effekte* oder *mehrstufige Absorption* dazu führen, daß ein Teil des Laserlichtes mit einer deutlich kleineren Wellenlänge, z. B. der Hälfte oder einem Drittel der Laserwellenlänge ausgesandt wird.

Das Ziel des NanOp High-Power-Laserprojektes, das vom BMB+F im Rahmen des Forschungsschwerpunktes "Laser 2000" gefördert wird, ist, Hochleistungs-Laser-

dioden auf Galliumarsenid-Basis zu entwickeln. Ein Anwendungsbeispiel sind Pump-laser mit einer Emissionswellenlänge von 1120 nm, die zum Pumpen von Thulium-dotierten Glasfaserlasern geeignet sind. Diese Faserlaser emittieren mit einem Wirkungsgrad von etwa 30 % Laserlicht bei 470 nm (entsprechend der Farbe blau). Dieses Konzept ermöglicht die Herstellung blauer Laser mit hoher optischer Ausgangsleistung, z. B. für Laser-TV und andere Displayanwendungen.

Ein Pumplaser mit einer Wellenlänge von 1120 nm und mit Galliumarsenid als Substratmaterial ist nur mit Hilfe von Halbleiter-Quantenpunkten herstellbar. Die Quantenpunkte haben zusätzlich den Vorteil, daß die Laser-Verstärkung um ein vielfaches höher ist als bei einem konventionellen Laser. Damit wird bei gleicher elektrischer Anschlußleistung eine höhere Lichtleistung und somit ein höherer Wirkungsgrad erzielt. Das bedeutet wiederum geringere elektrische Verluste und weniger Abwärme, die durch Kühlung abgeführt werden muß.

Die ersten im Rahmen dieses Projektes hergestellten Quantenpunktlaser erreichen optische Ausgangsleistungen von 3,7 und 4 Watt bei 940 nm bzw. bei 1100 nm. Dies entspricht der sichtbaren Lichtleistung einer 100 Watt Glühbirne, allerdings konzentriert auf eine einzige Wellenlänge und erzeugt von einem Bauelement, dessen Größe nur ein Bruchteil der Größe des Wolframfadens einer Glühbirne ist.

Zur Finanzierung

Die Arbeiten von *NanOp* werden zu einem Anteil von durchschnittlich 60% vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanziert. Einen Anteil von etwa 40% steuern die Mitglieder von *NanOp* bei, den größten Teil davon wiederum die Industriepartner in Form von Arbeitsleistungen und Materialien. Aber auch die Forschungsinstitute und Universitäten liefern im Rahmen ihrer Grundausstattung eigene personelle und materielle Beiträge. Diese Eigenleistungen sind wichtige Voraussetzung für die Förderung durch das BMB+F. Insgesamt wird so sichergestellt, daß durch die Fördermittel tatsächlich industrierelevante Arbeiten gefördert werden.

Für alle sechs Nanostruktur-Kompetenzzentren steht bis voraussichtlich 2003 eine Gesamtsumme von bis zu 200 Mio. DM zur Förderung von Projekten zur Verfügung. Die Entscheidung über die Förderungswürdigkeit von Forschungsprojekten trifft ein internationales Expertengremium im Auftrag des BMB+F. Dabei wird zuerst eine Skizze des Projekts einer ersten Begutachtung unterzogen. Im Falle der Zustimmung des Gutachtergremiums muß vom Antragsteller eine detaillierte Projektbeschreibung nachgereicht werden, auf deren Grundlage in einer zweiten Begutachtungsrunde dann endgültig über die Vergabe der Fördermittel entschieden wird. Durch dieses Verfahren wird eine hohe Qualität der geförderten Projekte sichergestellt.

Bedeutung der Nanotechnologie in der Optoelektronik

Optoelektronik ist die Sparte der Halbleitertechnik, die sich mit der Umsetzung von elektrischem Strom in Licht bzw. von Licht in elektrischen Strom beschäftigt. Es geht also kurz gesagt um die Erforschung, Entwicklung, Verbesserung und Anwendung von Bauelementen wie Leuchtdioden, Laserdioden, Photodetektoren und Solarzellen. Eine Sonderstellung nehmen die Wellenleiter ein, das Halbleitergegenstück zur Glasfaser. Obwohl sie weder Strom in Licht umsetzen noch umgekehrt, sind sie als passive Bauelemente wichtige Bausteine für die Herstellung integrierter optischer Schaltungen.

Wie die Themen der ersten fünf Forschungsprojekte zeigen, beschäftigt sich *NanOp* derzeit hauptsächlich mit der Erforschung neuer Konzepte für Halbleiterlaser. Obwohl Halbleiterlaser seit bald zwei Jahrzehnten kommerziell hergestellt werden, bietet der Einsatz von Nanostrukturen ein großes Potential für Verbesserungen. Gleichzeitig ist der Laserbereich derjenige Forschungszweig der angewandten Halbleiter-Nanotechnologie, der international am weitesten fortgeschritten ist.

Nanostrukturen sind in der Halbleitertechnik kein völlig neues Thema: seit beinahe einem Vierteljahrhundert gibt es Halbleiter-Nanostrukturen, nämlich *Quantenfilme*. Das sind Halbleiterschichten von wenigen Atomlagen Dicke, die in einer geeigneten Kombination mit den sie umgebenden Materialien Elektronen "einfangen" können. Normalerweise können sich Elektronen in einem Halbleiterkristall frei in alle Richtungen bewegen, die in einem Quantenfilm eingefangenen Elektronen aber sind in ihrer Bewegungsfreiheit eingeschränkt, und können sich nur noch in der Ebene des Quantenfilms bewegen. Senkrecht dazu ist keine Bewegung mehr möglich: die Elektronen sind in einer Raumrichtung "eingeklemmt". Dieser Effekt wird *Quantum Confinement* genannt. Er führt dazu, daß die Eigenschaften der eingesperrten Elektronen deutlich von quantenmechanischen Effekten bestimmt werden, und einige heute gebräuchliche Bauelemente der Elektronik und Photonik nutzen diese speziellen Eigenschaften. Da sich Elektronen in Quantenfilmen allerdings noch in zwei Raumrichtungen frei bewegen können, stellen diese Systemen im Prinzip eine Mischung von zwei Dritteln quasi-klassischer Physik und einem Drittel Quantenmechanik dar.

In den letzten zehn Jahren wurde weltweit daran gearbeitet, das Konzept des *Quantum Confinement* über den Quantenfilm hinaus weiterzuentwickeln. Man wollte den Zwei-

Drittel-Anteil der quasiklassischen Physik eliminieren und Strukturen schaffen, deren Eigenschaften ausschließlich von der Quantenmechanik bestimmt werden. Diese Strukturen - *Quantenpunkte* - sollten in allen drei Raumrichtungen so klein sein, daß sie Elektronen wie in einer Art Käfig "unbeweglich" einsperren können. Ihre Eigenschaften werden so denen eines einzelnen Atoms ähnlich, weshalb sie auch gelegentlich als "künstliche Atome" bezeichnet werden. Vor etwa fünf Jahren gelang durch die Ausnutzung von *Selbstorganisationseffekten* ein Durchbruch, der seitdem die einfache Herstellung von Quantenpunkten mit hoher Qualität ermöglicht.

Für die Optoelektronik sind Quantenpunkte von großer Bedeutung. Bisher war der Wellenlängenbereich, der mit lichtemittierenden Halbleiterbauelementen abgedeckt werden konnte, beschränkt durch die zur Verfügung stehenden Halbleitermaterialien. Die Wellenlänge des Lichts, das aus einem Halbleiterkristall ausgesandt wird, hängt nur von der *fundamentalen Bandlücke* ab, einer Materialeigenschaft des Halbleiters. Durch die Kombination verschiedener Materialien zu Mischhalbleitern kann die Bandlücke innerhalb eines gewissen Spielraums variiert werden. Dieser Spielraum ist aber begrenzt, da sich nicht alle Halbleitermaterialien beliebig miteinander mischen lassen. Ein Grund hierfür sind die unterschiedlichen Größen der Kristallgitter verschiedener Halbleitermaterialien. Da Halbleiterbauelemente immer auf einem Substrat, als einem "Fundamentkristall" hergestellt werden, muß die Gittergröße von Mischkristallschichten immer eng mit der Gittergröße des Substrates übereinstimmen. Obwohl rund 25 einfache - *binäre* - Verbindungshalbleiter die Ausgangsbasis für eine fast beliebige Zahl von möglichen Mischkristallen bilden, gibt es nur vier Materialien, die heute als Substrate eine technologische Bedeutung haben. Allen voran steht dabei Silizium, das Material der Halbleiterelektronik. Daneben sind Galliumarsenid und Indiumphosphid, die Basismaterialien für Hochgeschwindigkeitselektronik und Photonik, sowie Galliumphosphid für die Optoelektronik wichtig. Ein fünftes Material, das erst seit wenigen Jahren benutzt wird, und das im Zusammenhang mit dem Halbleiter Galliumnitrid an Bedeutung für blaue und ultraviolette Leuchtdioden und ultraviolette Laser gewinnt, ist Aluminiumoxid (Saphir). Die geringe Zahl an industriell relevanten Substratmaterialien schränkt die Wellenlängenbereiche stark ein, in denen lichtemittierende Halbleiterbauelemente hergestellt werden können. Weitere Probleme sind die geringe strukturelle Qualität, mit der einige Halbleitermaterialien bislang nur herge-

stellt werden können, und ihre schlechte mechanische Haltbarkeit, die dazu führt, daß Bauelemente im Betrieb schnell kaputt gehen. Eine Folge dieser Schwierigkeiten war, daß es zwanzig Jahre lang effiziente Leuchtdioden zwar in den Farben rot, orange, gelb und gelbgrün gab, nicht aber in blau, türkis oder blaugrün, und das obwohl - theoretisch - geeignete Halbleitermaterialien zur Verfügung standen, die aber technologisch nicht in den Griff zu bekommen waren.

Der entscheidende Fortschritt Nanotechnologie ist nun, daß die Wellenlänge, auf der ein Halbleiter-Quantenpunkt Licht aussendet, nicht nur von dem Material bestimmt wird, aus dem er hergestellt ist bzw. von dem er umgeben ist, sondern auch in erheblichem Maße von seiner *Form* und *Größe*. Diese aber lassen sich in relativ weiten Bereichen variieren. Für photonische Bauelemente bedeutet das einen *neuen Freiheitsgrad* bei der Wahl der Arbeitswellenlänge. So wird es möglich, trotz der sehr kleinen Zahl technisch gebräuchlicher Substratmaterialien, den gesamten Spektralbereich vom Ultraviolett bis zum fernen Infrarot fast lückenlos abzudecken. Außerdem wird es möglich, die für Standardanwendungen gebräuchlichen Wellenlängen - z. B. 1,3 μm und 1,55 μm für die Nachrichtentechnik - mit Bauelementen zu erzielen, die auf vergleichsweise sehr preiswerten Substraten wie z. B. Galliumarsenid hergestellt werden können. Es wird sogar möglich, mit Hilfe von eingebauten Quantenpunkten Lichtemitter auf Silizium herzustellen, dem Basismaterial der Halbleiterelektronik, das für Lichtemitter selbst prinzipiell untauglich ist.

Neben dem erweiterten Wellenlängenbereich und der größeren Unabhängigkeit vom Substratmaterial gibt es noch eine Vielzahl weiterer Vorteile des Einsatzes von Quantenpunkten in photonischen Bauelementen, die hier aber nur kurz aufgezählt werden sollen:

- **Laser mit niedrigerem Stromverbrauch:** Quantenpunkte sind ein äußerst effizientes optisches Verstärkungsmedium für einem Laser. Die für den Laserbetrieb wichtige *Besetzungsinversion* der Laserniveaus ist in einem Quantenpunkt bereits in dem Moment erreicht, da er ein Ladungsträgerpaar aufgenommen hat. Das bedeutet, daß der Strom, der notwendig ist, um einen Quantenpunktlaser in Gang zu setzen, deutlich geringer ist als bei einem herkömmlichen Laser. Das bedeutet gleichzeitig geringere elektrische Verluste, die als Abwärme abgeführt werden

müssen und einen erheblich verbesserten Wirkungsgrad. Bereits jetzt sind Quantenpunktlaser - obwohl es erst seit drei Jahren Labormuster gibt - in Bezug auf die elektrischen Leistungsdaten gleichwertig mit den seit zwanzig Jahren optimierten, Quantenfilm-Lasern.

- **Hochgeschwindigkeits-Laser:** In der Nachrichtentechnik ist ein wesentliches Kriterium der Leistungsfähigkeit eines Lasers seine *Modulationsbandbreite*. Diese ist einfach gesprochen ein Maß dafür, wie schnell sich der Laser in Folge an- und ausschalten läßt. Da Quantenpunktlaser bereits schneller den Lasing-Zustand erreichen (s. o.), ist auch zu erwarten, daß sie eine größere Modulationsbandbreite besitzen. Die ersten Messungen dazu, die vor etwa einem Jahr veröffentlicht wurden, lassen in dieser Hinsicht einiges erwarten.
- **Temperaturstabilität:** Ein großes Problem von Halbleiterlasern ist die Stabilität der Emissionswellenlänge. In Hochleistungssystemen mit paralleler Übertragung muß die Wellenlänge eines Lasers auf Bruchteile eines Nanometers genau konstant gehalten werden. Die Wellenlänge schwankt aber stark mit der Temperatur des Bauelements, so daß aufwendige Temperaturregelungen notwendig werden. Quantenpunkt-Laser sind in auch dieser Hinsicht besser, da ihre Emissionswellenlänge weit weniger stark von der Temperatur abhängt.

Ausblicke und Visionen

Am Ende steht die Frage: "Was bringt uns diese Technik?" Wir versuchen im folgenden, ein paar Ausblicke zu geben. Ausgehend vom gegenwärtigen Wissensstand über die Nanotechnologie in der Optoelektronik versuchen wir, sortiert nach Anwendungsgebieten, abzuschätzen, welche Änderungen in fünf bis zehn Jahren erwartet werden:

- **Nachrichtentechnik:** Durch preiswertere Lasersysteme und in integrierter Bauweise herzustellbare Sender- und Empfängermodule wird die Hochgeschwindigkeits-Glasfaservernetzung bis zum Hausanschluß vorangetrieben. Dem Endkunden steht eine riesige Datenbandbreite zur Verfügung: Interaktive Video-Anwendungen, Bildtelefonie und Video-On-Demand sind Dienste, die sich dann einfach realisieren lassen. Das Internet als weltweites Kommunikationsnetz wird immer stärker für individuelle, multimediale Dienste genutzt werden.
- **Computertechnik:** Die optische Verbindung von Computerbauelementen wird eine erhebliche Leistungssteigerung zur Folge haben, besonders auch im bezug auf Datenaustausch und Datenspeicherung. Diese Leistungssteigerung wird um Größenordnungen über das hinausragen, was in den letzten Jahren durch fortschreitende Miniaturisierung und Verbesserung des Prozessordesigns erzielt wurde. Einfache und preiswerte Systeme ermöglichen Hochgeschwindigkeits-Glasfaservernetzungen bereits für kleine Büros. Neue Speichermedien werden viel größere Informationsmengen viel schneller verfügbar machen. Bietet heute die DV-Disc die Möglichkeit, einen abendfüllenden Videofilm zu speichern, werden kommende Generationen von optischen Speichermedien gleich mehrere Filme aufnehmen können oder neue Formen von interaktiven Filmen mit verschiedenen Ablaufalternativen. Über einen längeren Zeitraum (von 15 bis 20 Jahren) werden Quantencomputer im Zusammenhang mit der Nanotechnologie an Bedeutung gewinnen. Damit wird sich eine Revolution auf dem Gebiet der Datenverarbeitung vollziehen, deren Ausmaße aber bisher noch nicht einmal ansatzweise abzusehen sind.
- **Heimelektronik:** Hier wird die größte Umwälzung durch das Laser-Projektionsfernsehen zu erwarten sein. Statt des unhandlichen Fernsehers wird ein kleines, z. B. an der Decke montiertes Projektionssystem ein Fernsehbild im Kinoformat

scharf und verzerrungsfrei auf eine Wand projizieren. Solche Systeme, in denen hochentwickelte Optoelektronik mit innovativer Mikrosystemtechnik zusammenarbeitet, werden in fünf bis zehn Jahren marktreif sein. Eine noch wichtigere Entwicklung wird in der Beleuchtungstechnik stattfinden: der Abschied von Glühbirne und Leuchtstoffröhre. Beleuchtungssysteme aus einer Kombination von Leuchtdioden der Grundfarben rot, grün und blau werden als Beleuchtungsquellen dienen. Sie besitzen einen hohen elektrischen Wirkungsgrad und reduzieren den Energiebedarf für Beleuchtung im Haushalt bis auf ein Zehntel des heutigen Wertes. Gleichzeitig sind diese Systeme extrem kompakt, so daß neue Lampenbauformen möglich werden. Schließlich besitzen sie eine vielfach höhere Lebensdauer als Glühlampen.

- **Im Umweltschutz und in der Umweltanalytik** werden durch neue, kompakte Lasersysteme flexible Überwachungs- und Analysesysteme für die Schadstoffkontrolle verfügbar. Diese Systeme sind in der Herstellung extrem preiswert und ermöglichen zum Beispiel Heizungsanlagen in Ein- und Mehrfamilienhäusern mit einem Abgasüberwachungssystem auszustatten und durch eine intelligente Steuerung ständig eine möglichst schadstoffarme und damit umweltfreundlichere Verbrennung zu gewährleisten.
- **In der Medizintechnik** werden ähnlich wie in der Umwelttechnik neue, optische Meß und Analyseverfahren möglich, die im Zusammenhang mit einer erheblichen Miniaturisierung zu ganz neuen Einsatzfeldern führen. Ein Beispiel ist ein miniaturisierter Sensor, den sich Diabetiker unter die Haut implantieren lassen können, und der laufend den Blutzuckerwert mißt. Er steht in Verbindung mit der Regелеlektronik einer kleinen Insulin-Pumpe, die so immer die richtige Insulinmenge an das Blut des Patienten abgeben kann. Damit wird die Blutprobe zur Bestimmung des Blutzuckerwertes, die sich diese Patienten bislang mehrmals täglich entnehmen müssen, überflüssig.

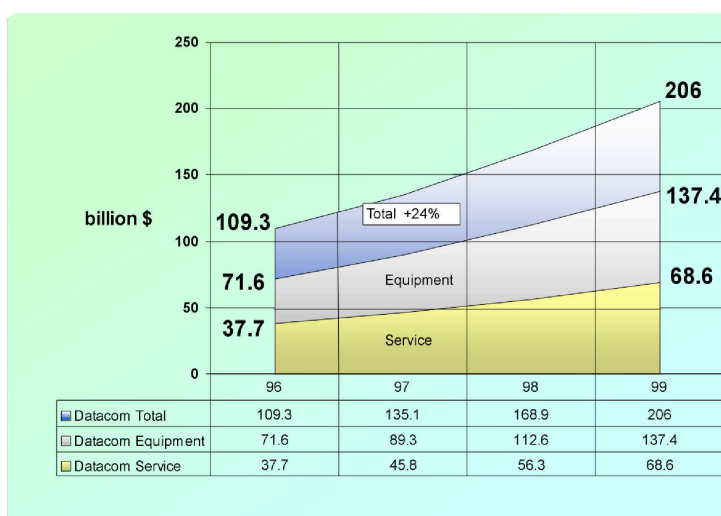
Dies sind wenige, relativ fundierte Beispiele dafür, wie sich unsere Zukunft durch die Nanotechnologie in der Optoelektronik verändern wird. Die Nanotechnologie wird eine riesige Zahl von neuen Anwendungen ermöglichen und andere, bereits bestehende

erst wirtschaftlich machen. Dabei wird die Nanotechnologie selbst, die das alles ermöglicht, für den Benutzer stets verborgen bleiben. Sie ist viel zu klein, als das wir sie mit den Sinnen wahrnehmen könnten. Wir werden nur ihre Auswirkungen, die unser Leben vielfältig verändern werden, spüren: Auch von all den komplexen mikroskopischen Vorgängen in unserem körpereigenen Immunsystem nehmen wir nichts wahr, wir haben nur das Gefühl körperlichen Wohlbefindens. In genau der gleichen Weise werden wir zum Beispiel kompakte Laserfernseher genießen, aber die Halbleiter-Quantenpunkte selbst, die das alles ermöglichen, werden sich unserer Wahrnehmung entziehen.

Wirtschaftliche Aspekte

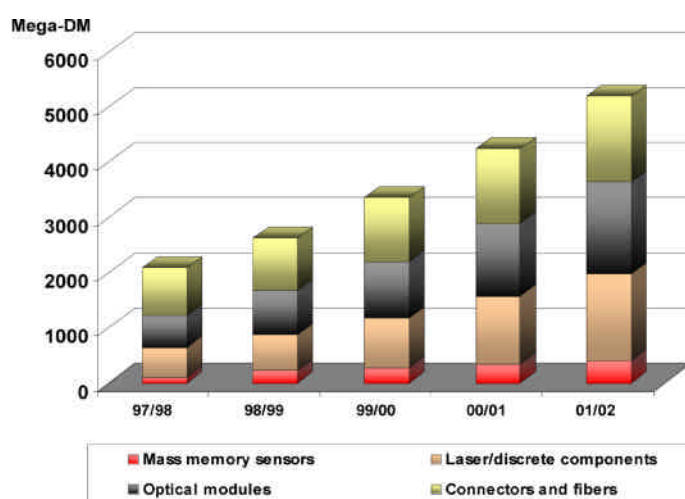
Die überwiegende Zahl zukünftiger Anwendungen der nanotechnologiebasierten Optoelektronik liegt in der Nachrichtentechnik, der Computertechnik, der Umwelttechnik und der Konsumelektronik. Die wirtschaftliche Bedeutung dieser Sparten wird in den kommenden fünf Jahren dramatisch zunehmen. Grund hierfür ist die immer stärkere Verbreitung von optoelektronischen Systemen in Industrie und Technik. Optoelektronische Bauelemente sind dabei oft die Schlüsselemente für komplexere Systeme - so ist beispielsweise der Siegeszug der Compact Disc erst durch die billige Massenproduktion von Halbleiterlasern ermöglicht worden. Hier ermöglicht die Nanotechnologie in der Optoelektronik eine

deutliche Reduzierung der Herstellungskosten für Bauteile. Gleichzeitig wird sich der Bereich der integrierten Optoelektronik stark entwickeln und eine erhebliche wirtschaftliche Bedeutung bekommen.



Entwicklung des Weltmarktes für Datenübertragungssysteme

[Quelle: 1997 Data Comm Forecast, Yankee Ingenuity Group]



Entwicklung des Weltmarktes für faseroptische Komponenten

[Quelle: Siemens Marketing]

Integrierte optische Sender- und Empfängermodule in der Nachrichtentechnik beispielsweise erschließen einen Massenmarkt für die Vernetzung von Haushalten durch Glasfasersysteme.

Der Weltmarkt für optoelektronische Bauelemente wird sich bis 2003 voraussichtlich

auf mehr als 5 Mrd. DM verdoppeln. Parallel dazu entwickelt sich der Markt für optoelektronische Systeme, dessen Wert im Jahre 2003 auf 1000 bis 5000 Mrd. DM geschätzt wird. Diese immense Summe kommt durch die große Wertsteigerung zustande, die bei optoelektronischen Systemen typisch ist: die optoelektronischen Schlüsselkomponenten eines Systems sind vergleichsweise billig, aber sie ermöglichen ein Gesamtsystem von vielfach größerem Wert. Ein gutes Beispiel hierfür ist ein CD-Spieler: der Halbleiterlaser, der das Auslesen der CD erst ermöglicht, ist mittlerweile für etwa eine DM zu haben, das Gesamtsystem CD-Spieler kostet jedoch mindestens das zweihundertfache.

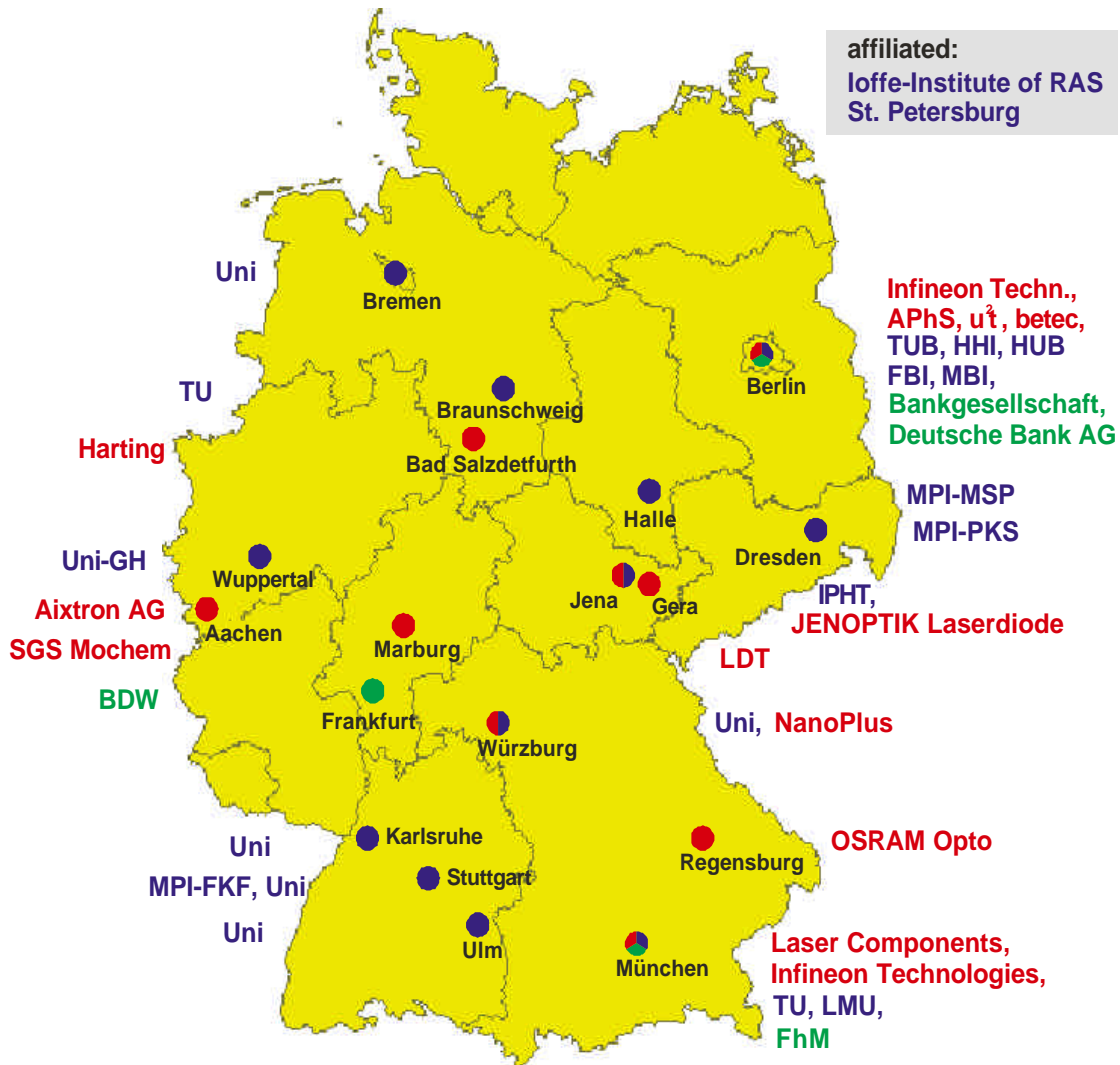
Diese wirtschaftlichen Perspektiven des Optoelektronik-Marktes und die Bedeutung, die die Nanotechnologie dabei spielt, sind natürlich kein Geheimnis. Weltweit arbeiten viele Firmen und Forschungsinstitute, um von diesem Wachstumsmarkt zu profitieren. In der Bundesrepublik Deutschland ist auf den Gebieten Optoelektronik und Nanotechnologie bereits großes Wissen vorhanden, und unsere Forschung steht weltweit mit an vorderster Stelle. Es ist besonders wichtig, dieses Potential zu nutzen, zu erweitern und für die Wirtschaft nutzbar zu machen. Dieser Schritt erfordert ein Umdenken sowohl in der Forschung als auch in der Industrie. Die Forschung muß sich viel stärker und früher als bisher um die praktische Bedeutung und die Verwertbarkeit ihrer Arbeit kümmern, und die Industrie muß noch enger an die Grundlagenforschung angebunden werden und sie kritisch begleiten, aber auch den Mut zum Risiko aufbringen, in neue Technologien verstärkt zu investieren. Hier bieten sich aber auch Möglichkeiten für neue, kleine Hochtechnologiefirmen, die den Zwischenraum zwischen universitärer und außeruniversitärer Forschung und der Industrie überbrücken, und die sehr flexibel auf neue Trends reagieren können.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung hat mit der Einrichtung der Nanostruktur-Kompetenzzentren einen wichtigen ersten Schritt getan, weitere müssen folgen. Wenn es uns gelingt, unsere Chancen zu nutzen, kann Deutschland rechtzeitig von dem Wachstum des Optoelektronik-Marktes profitieren. Wenn sich Firmen finden, die in die Zukunft der Optoelektronik investieren, so wird sich in wenigen Jahren jede investierte Mark vielfach amortisieren.

Das Kompetenzzentrum *NanOp* wird das Know-How für nanotechnologiebasierte Optoelektronik in Deutschland beträchtlich erweitern. Durch ständige Innovationen wird so für den Standort Deutschland auf diesem international rapide wachsenden Markt ein erheblicher Wettbewerbsvorteil entstehen. Denn:

Wer aufhört besser zu werden, hört auf, gut zu sein!

Mitglieder von NanOp



Management-Komitee:

- Prof. Dr. Dieter Bimberg (TU Berlin) - Vorsitzender
- Prof. Dr. Alfred Forchel (U Würzburg)
- Dr. Norbert Grote (HHI Berlin)
- Dr. Klaus Schulz (Infineon AG)

Mitglieder:

- Advanced Photonic Systems GmbH, Berlin
- Aixtron AG, Aachen
- HARTING Elektro-Optische Bauelemente GmbH & Co. KG Bad Salzdetfurth
- Infineon Technologies AG, München
- Jenoptik Laserdiode GmbH, Jena
- Laser Components GmbH, München
- Laser-Display-Technologie GmbH & Co. KG, Gera
- OSRAM Opto Semiconductors GmbH & Co., Regensburg
- Siemens AG, Berlin / München
- SGS Mochem Products, Marburg
- u²t Innovative Optoelectronic Components, Berlin
- Ferdinand-Braun-Institut für Höchstfrequenztechnik, Berlin
- Heinrich-Hertz-Institut für Nachrichtentechnik GmbH, Berlin
- Max-Born-Institut für nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie, Berlin
- Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart
- Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, Halle
- Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme, Dresden
- Institut für Physikalische Hochtechnologie, Jena
- Humboldt Universität zu Berlin, Institut für Physik
- Ludwig-Maximilians-Universität München, Sektion Physik
- Technische Universität Berlin, Institut für Festkörperphysik
- Technische Universität Braunschweig, Institut für Halbleitertechnik
- Technische Universität Karlsruhe, Laboratorium für Elektronenmikroskopie
- Technische Universität München, Walter-Schottky-Institut
- Universität Bremen, Institut für Festkörperphysik
- Universität Stuttgart, 4. Physikalisches Institut
- Universität Ulm, Abteilung Optoelektronik
- Universität Würzburg, Physikalisches Institut - Mikrostukturlabor
- Universität Würzburg, Physikalisches Institut - Experimentelle Physik III
- Universität GH Wuppertal, FB Elektronik und Institut für Materialwissenschaften
- Abraham F. Ioffe Physico-Technical Institute, St. Petersburg
- Fraunhofer Management-Gesellschaft, München
- Bankgesellschaft Berlin
- Deutsche Bank AG

Literatur

Ein Buch zum zentralen wissenschaftlichen Thema "Quantenpunkte in Halbleiterstrukturen" erschien im Januar 1999 im Verlag John Wiley & Sons (New York):
D. Bimberg, M. Grundmann, N. N. Ledentsov: Quantum Dot Heterostructures

Kontakt

Wenn Sie Fragen zu unserer Arbeit haben, setzen Sie sich gerne in Verbindung mit dem Sekretariat des Kompetenzzentrums *NanOp* an der TU Berlin:

Renate Seyfried-Schramm, Dipl. Phys. Volker Türck
Sekretariat *NanOp*
Technische Universität Berlin, Sekr. PN 5-6
Hardenbergstr. 36
D-10623 Berlin

Tel: 030 - 314 79 605
FAX: 030 - 314 75 138

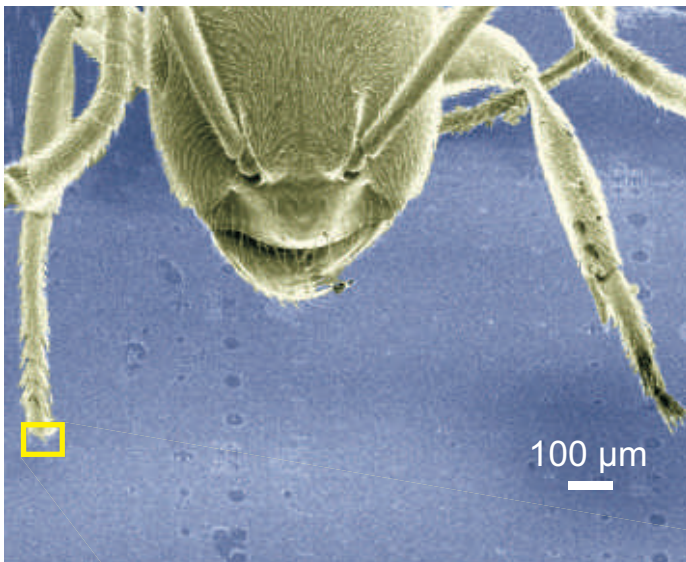
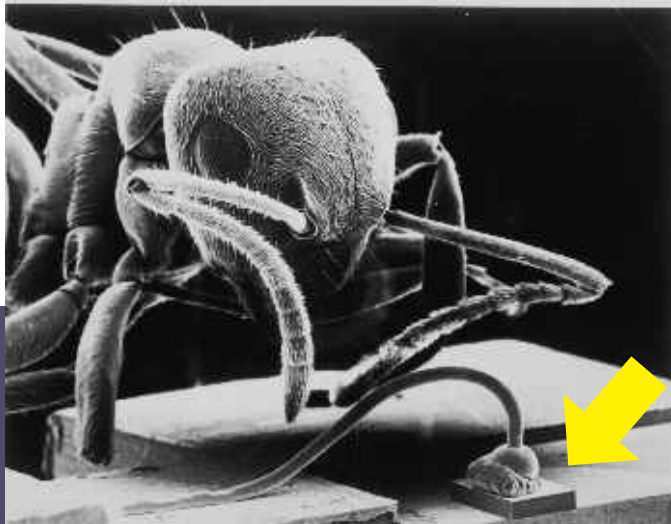
E-Mail: nanop@sol.physik.TU-Berlin.DE

Laufend aktuelle Informationen finden Sie im Internet unter: <http://www.nanop.de>

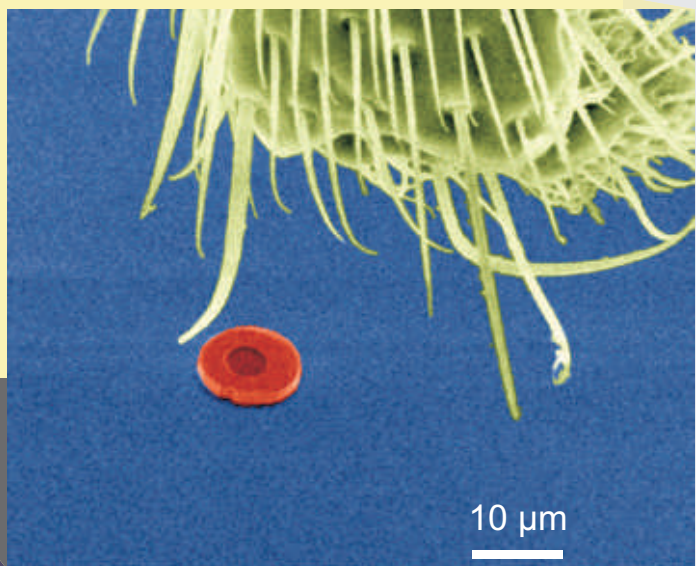
Impressum:

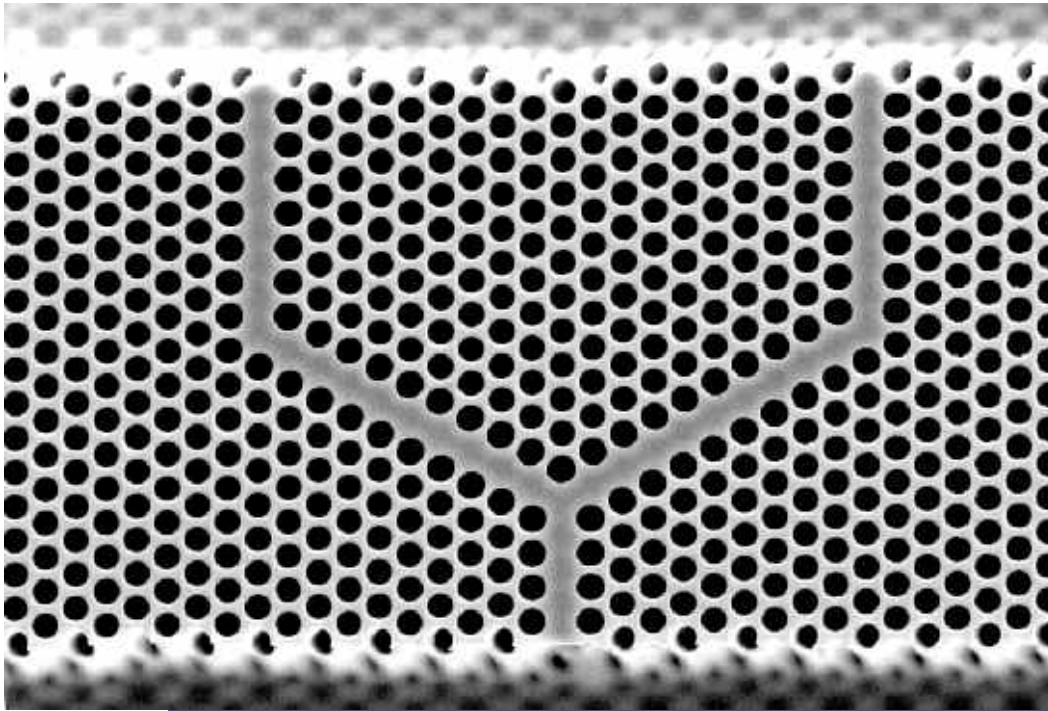
Diese Presseinformation wurde erstellt zur Hannovermesse 2000
Stand der Informationen: 13. März 2000.
© 2000 *NanOp* und TU Berlin

Größenvergleich eines
konventionellen Infrarot-
Halbleiterlasers mit einer
Ameise

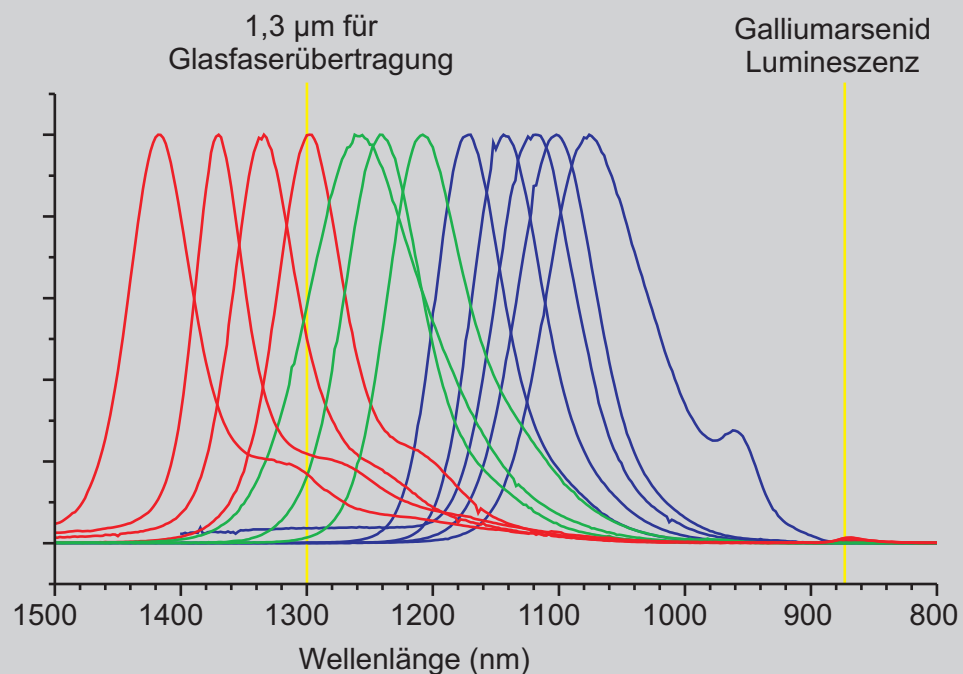


Größenvergleich eines
oberflächenemittierenden
Halbleiterlasers (VCSEL)
mit
dem Kopf einer Ameise

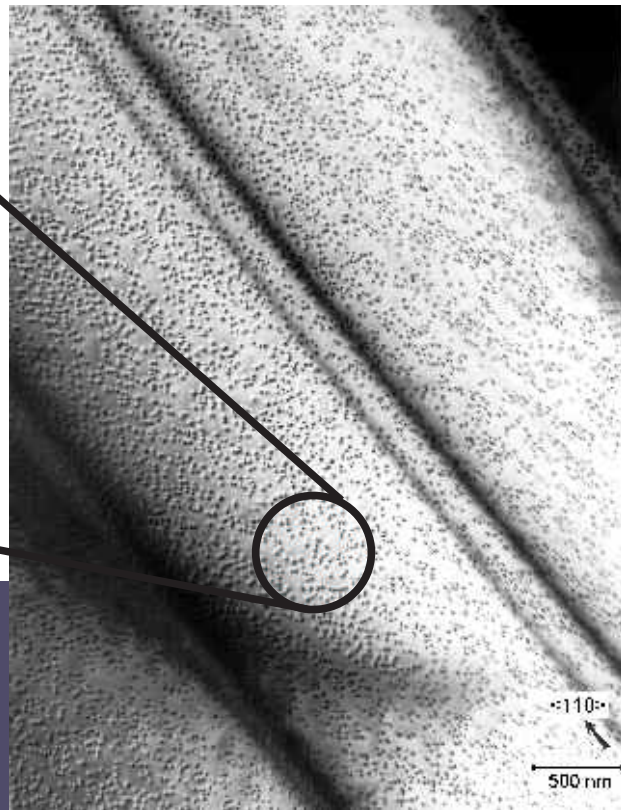
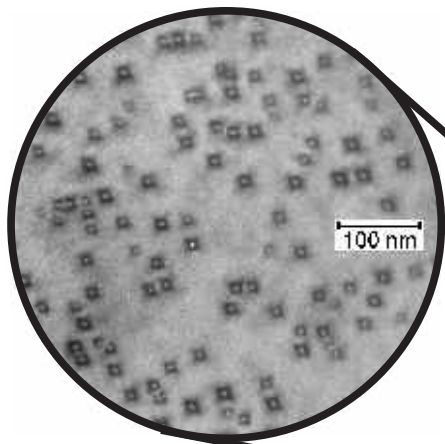




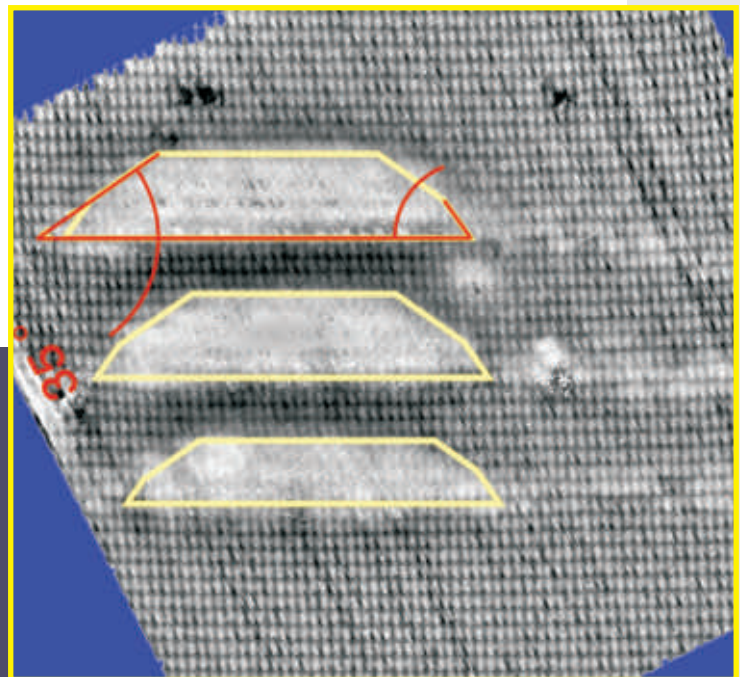
Künstlich erzeugte Defektstrukturen in makroporösem Silizium bilden optische Funktionselemente wie zum Beispiel einen Strahlteiler



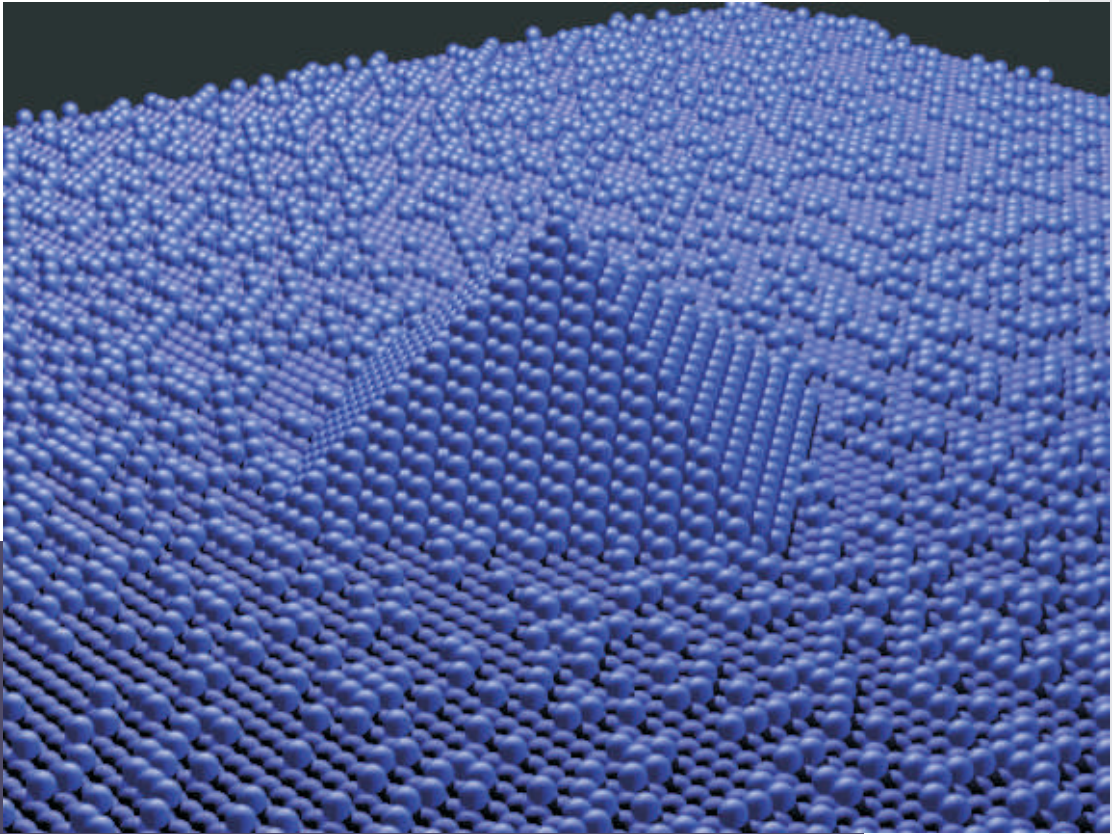
Verschiedene Lumineszenzspektren von Indiumarsenid Quantenpunkten in Galliumarsenid: der Wellenlängenbereich von 1000 nm bis 1400 nm wird vollständig abgedeckt



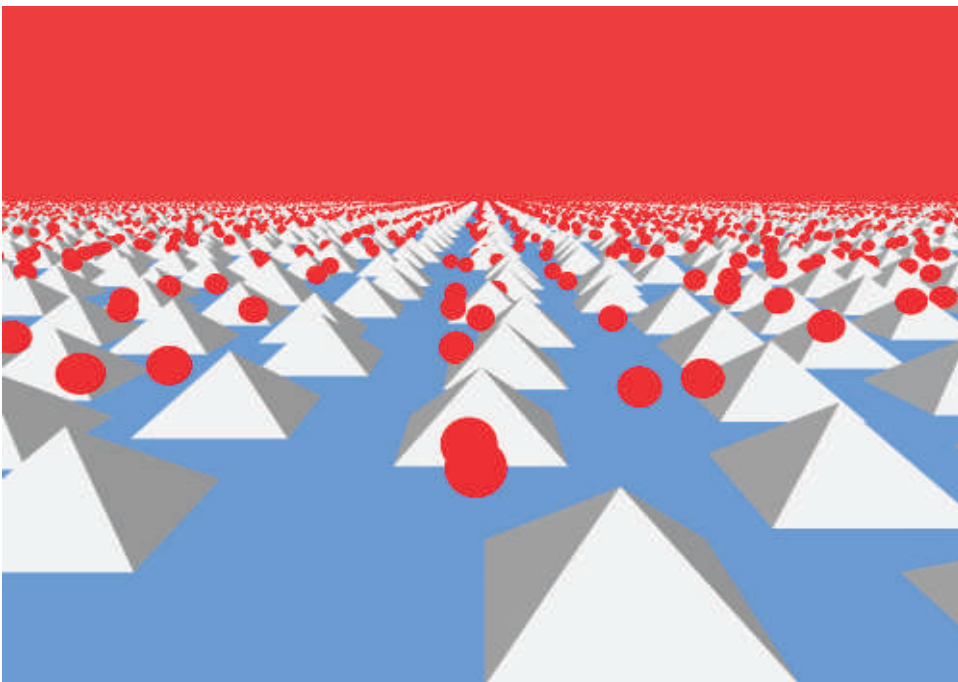
Aufsicht auf ein Feld von Halbleiter-Quantenpunkten mit dem Transmissions-Elektronenmikroskop



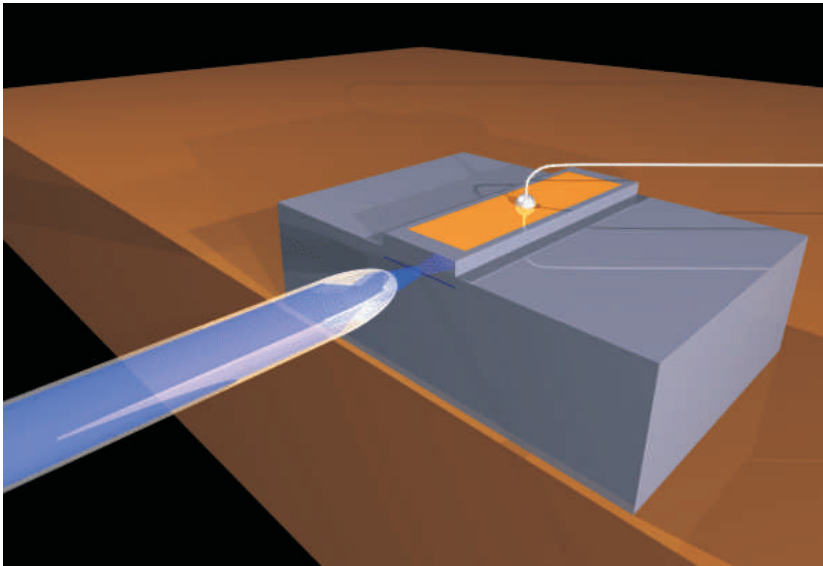
Raster-Tunnelmikroskop-Bild von drei aufeinander gestapelten Indiumarsenid Quantenpunkten in Galliumarsenid (Aufnahme im Querschnitt mit atomarer Auflösung)



Simulation des Wachstums eines pyramidenförmigen
Quantenpunktes auf einer Halbleiteroberfläche

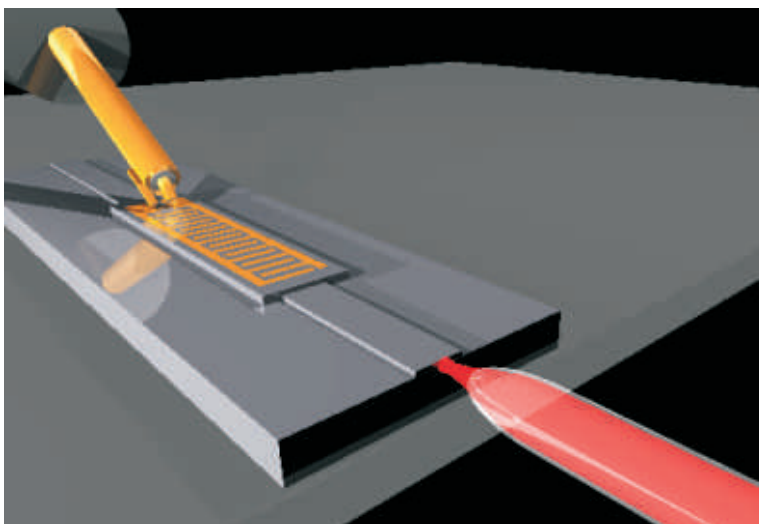
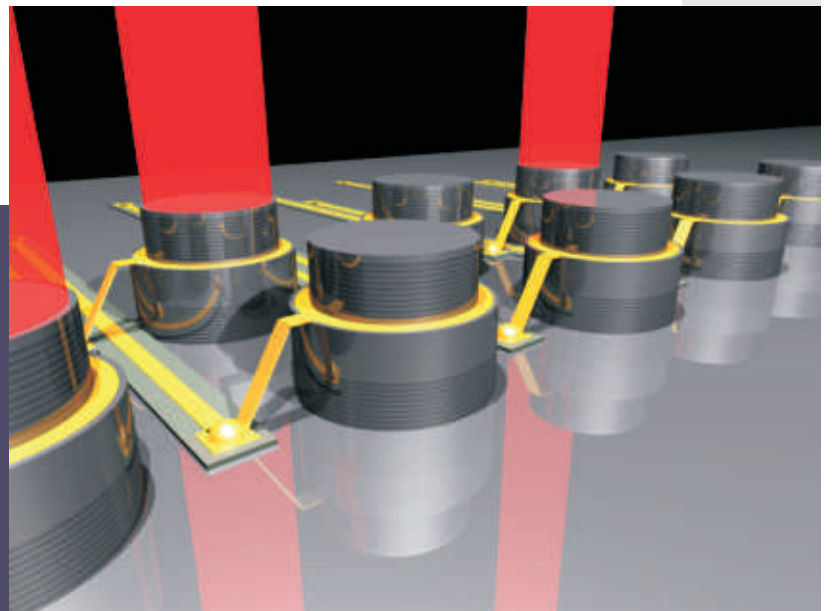


Schematische Darstellung des Inneren eines
Quantenpunktlasers



Ansicht eines blauen
Quantenpunktlasers in der
Bauausführung als
Kantenemitter
(hier dargestellt mit Ankopplung
an eine Glasfaser)

Regelmäßig angeordnetes
Feld von vertikal
emittierenden
Quantenpunktlasern (sog.
VCSELs), die in der
Computertechnik
Anwendung finden sollen



Halbleiter-Photodetektor auf
der Basis von Quantenpunkten
(aufgebaut in Wellenleiter-
geometrie d. h. das Licht wird
seitlich, über eine Glasfaser in
den Detektor geführt)