

Augenblicke voller Spannung

Drahtlose Energieversorgung bei elektronischen Retina-Implantaten

Zahlreiche Komponenten aus dem Bereich der Informations- und Kommunikationstechnik, der Medizintechnik, der Chemie, Biotechnologie oder der Optik sind heute ohne Mikrosystemtechnik nicht mehr vorstellbar. Dabei spielen Sensoren und Aktoren eine große Rolle, die Informationen drahtlos senden und empfangen können. Eine Energieversorgung des Mikrosystems durch Batterien stellt oft keine Lösung dar, da ein regelmäßiges Auswechseln nicht möglich ist. Unter dem Stichwort „Remote powering“ fasst man heute Techniken zusammen, die eine drahtlose Energieversorgung erlauben. Wissenschaftler der Universität Duisburg-Essen haben ein optoelektronisches Verfahren entwickelt, um ein Augen-Implantat mit Strom zu versorgen.

Andererseits sind auch die Möglichkeiten der Mikrosystemtechnik in den letzten Jahren deutlich gewachsen. Eine Verknüpfung beider Bereiche erscheint daher immer besser realisierbar.

Eine besondere Herausforderung stellt die Entwicklung von Augenimplantaten für erblindete Menschen dar. Es geht dabei um Krankheiten, bei denen zum Beispiel die Photorezeptoren in der menschlichen Netzhaut degenerieren und somit ihre Aufgabe als Signalempfänger nicht mehr wahrnehmen können. Ein so genanntes Retina-Implantat soll künftig die defekten Photorezeptoren technisch überbrücken. Der Knüller: Dieses Gerät soll nicht durch eine Batterie, sondern drahtlos mittels Infrarotlicht mit Energie versorgt werden.

Fortschreitender Tunnelblick

In Deutschland wird Blindheit mit einer Sehschärfe von nicht mehr als 2 Prozent und/oder einem Gesichtsfeld von nicht mehr als 5° definiert. Bei einer hochgradigen Sehbehinderung liegt die Sehschärfe zwischen 2 und 5 Prozent, wohingegen sie bei einer einfachen Sehbehinderung noch Werte zwischen 5 und 33 Prozent erreicht. Es gibt viele Ursachen für eine Sehbehinderung: Makuladegeneration, Glaukom (Grüner Star), maligne Myopie (Kurzsichtigkeit), Retinopathia Pigmentosa (RP), Netzhautablösung – um nur einige zu nennen. Die Schwere einer Erblindung lässt sich jedoch weniger gut in Zahlen als vielmehr in Bildern ausdrücken.

Kernbausteine dieses Systems sind eine Laserdiode als Energiequelle und eine angepasste photovoltaische Zelle (PVZ) zur Energiekonversion. Die photovoltaische Zelle arbeitet wie eine Solarzelle, erreicht aber beträchtlich höhere Wirkungsgrade, da die Farbe der Lichtquelle auf dieses Element angepasst ist. Die Energieversorgung kann durch Luft oder transparente Materialien erfolgen, wenn die Übertragungsstrecke – wie zum Beispiel bei einem Augenimplantat – kurz ist. Für andere Anwendungen kann zur Übertragung aber auch ein Lichtwellenleiter, zum Beispiel eine Glas- oder Polymer-Faser, verwendet werden. Dann kann die Strecke zwischen der Diode und PVZ sogar in den Bereich von Kilometern kommen – ohne große Einbußen beim Wirkungsgrad.

Das Thema *Neurotechnologie*, also der Ersatz ausgefallener Funktionen des menschlichen Nervensystems durch Informationstechnologien, hat in jüngster Zeit merklich an Bedeutung gewonnen. Einerseits weiß man zunehmend mehr über die Funktionsweise des menschlichen Nervensystems und der biologischen Informationsverarbeitung,



Abbildung 1: Optische Wahrnehmung bei normalsichtigen Personen (links) und Retinopathia Pigmentosa Betroffenen (rechts).

Quelle: Deutsche Retinitis Pigmentosa Vereinigung e. V.

Ein alltägliches Szenario – eine Verkehrsstraße soll überquert werden – verdeutlicht in Abbildung 1 die eingeschränkte optische Wahrnehmung eines Retinopathia Pigmentosa-Patienten. RP ist dadurch charakterisiert, dass sich nach und nach ein Tunnelblick ausbildet, der sich mit fortschreitendem Krankheitsverlauf immer mehr verengt. Dies bedeutet, dass die Betroffenen zuerst die Fähigkeit der räumlichen Orientierung verlieren, jedoch noch eingeschränkt fähig sind zu lesen. Im Endstadium tritt nicht selten der Verlust jeglicher optischer Wahrnehmung ein. Obwohl RP bereits vor 120 Jahren beschrieben wurde, gibt es bis heute weder medikamentöse noch chirurgische Möglichkeiten, den Prozess des Absterbens von Photorezeptoren zu stoppen oder zu verlangsamen.

Das menschliche Auge (Abb. 2) nimmt Licht, das im Normalfall von Hornhaut und Linse gebündelt wird, mit Hilfe von Photorezeptoren in der Netzhaut wahr. Hier durchdringen die Photonen zunächst die transparenten Nervenzellschichten und werden im hinteren Teil der Retina durch das Sehpigment Rhodopsin in den Stäbchen und Zapfen absorbiert. Dies löst eine Kette biochemischer Prozesse aus, die die Membranspannung in der Rezeptorzelle verändern. Von hier findet über eine komplex vernetzte neurale Struktur die weitere Signalverarbeitung bis zu den Ganglienzellen statt, deren Ausgänge den Sehnerv bilden und somit die Verbindung zum visuellen Kortex im Gehirn darstellen.

Stromversorgung ohne Batterien

Zerstörte Photorezeptoren können im Prinzip durch ein subretinal, also unter die Netzhaut implantiertes Array aus Mikro-Photodioden (MPD-Array, MPDA) ersetzt werden. Dabei wird der noch intakte Rest des Nervengewebes innerhalb der Retina von den Bipolarzellen an aufwärts genutzt. Das MPDA ersetzt quasi die ausgefallenen Stäbchen und Zapfen in der Netzhaut und sorgt für eine künstliche Aktivierung der Ganglienzellen. Dies stellt jedoch besondere Herausforderungen an die Implantatdicke und somit an die Aufbau-, Verbindungs- und Verkapselungstechnik.

Da es sich um ein aktives Implantat handelt, das ohne Batterie auskommen soll, müssen Techniken zur drahtlosen Energieeinkopplung zum Einsatz kommen (Abb. 3). Nur dadurch kann eine dauerhafte Implantation ohne zyklisch wiederkehrenden Batteriewechsel gewährleistet werden. Bei der Festlegung von technischen und biologischen Randbedingungen für eine optoelektronische Energieübertragung im nicht

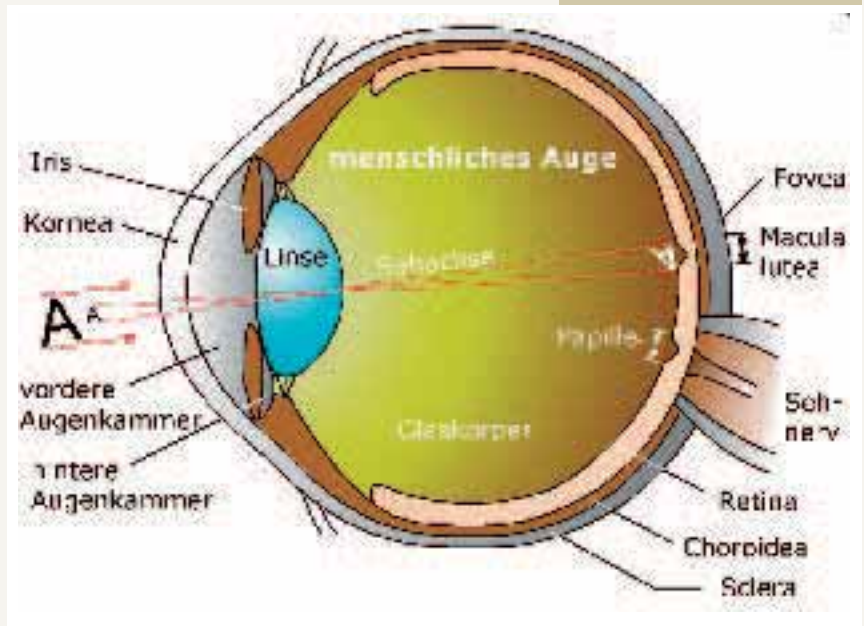


Abbildung 2: Anatomie des menschlichen Auges.

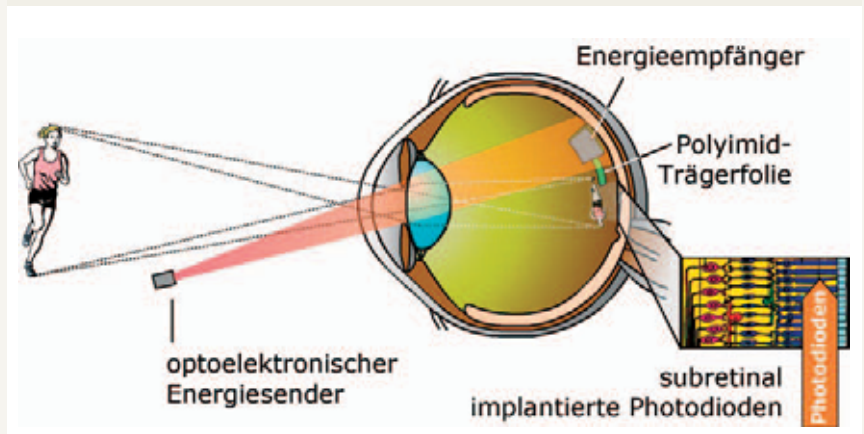


Abbildung 3: Konzept des subretinalen Implantats.

sichtbaren, infraroten Wellenlängenbereich um 850 Nanometer spielt die Einhaltung physiologischer Grenzwerte eine wichtige Rolle. Während bei der Bestrahlung mit sichtbarem Licht photochemische und thermische Schädigungen des Auges auftreten können, führt eine Infrarotbestrahlung mit Intensitäten von weniger als 1 Watt pro Quadratcentimeter lediglich zur Erwärmung, denn photochemische Schädigungen treten nur bei sichtbarer optischer Bestrahlung auf.

Durch die Kooperation mit Reginald Birngruber vom Laserzentrum Lübeck konnte das Duisburg-Essener Team um Dieter Jäger auf gesicherte Simulations- und Messergebnisse bei der Netzhautbestrahlung mit sichtbarem Licht zurückgreifen. Diese Daten wurden dann in den Infrarotbereich extrapoliert. Abbildung 4 zeigt die Mechanismen der photochemischen und thermischen Schädigung bei sichtbarer Strahlung ($\lambda = 458 \text{ nm}$).



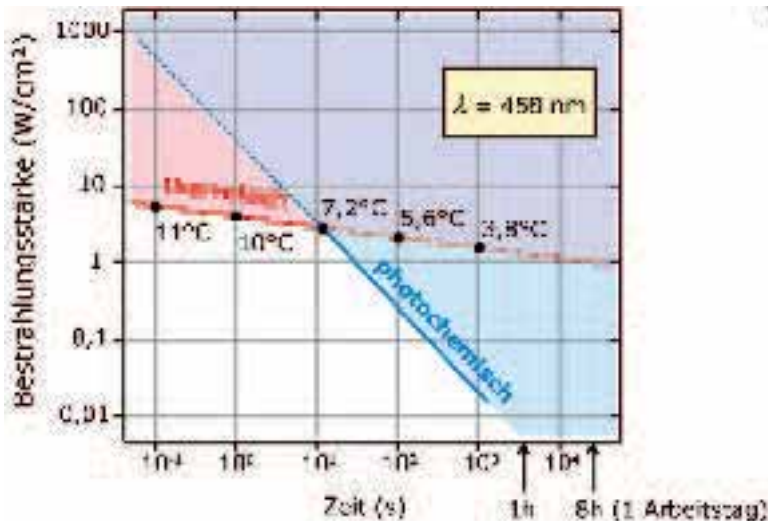


Abbildung 4: Photochemische und thermische Schädigungsschwellen bei optischer Bestrahlung der Netzhaut nach Birngruber et al.

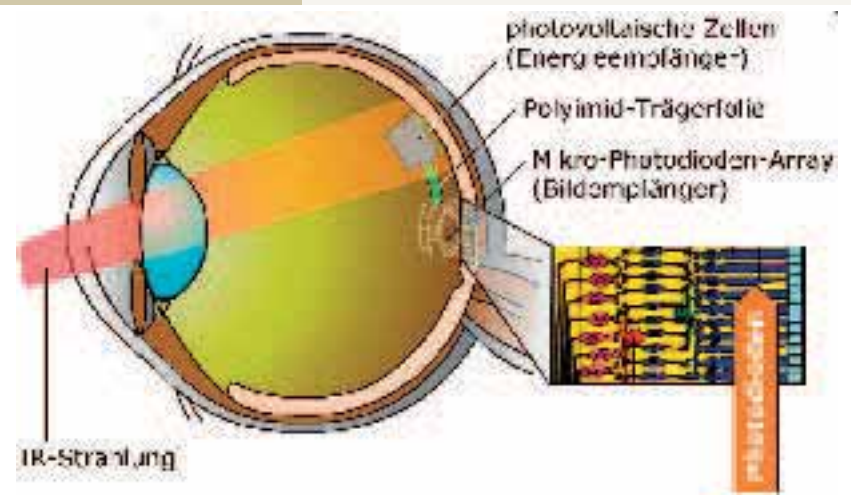


Abbildung 5: Optoelektronische Energieversorgung eines subretinal platzierten Netzhautimplantats.

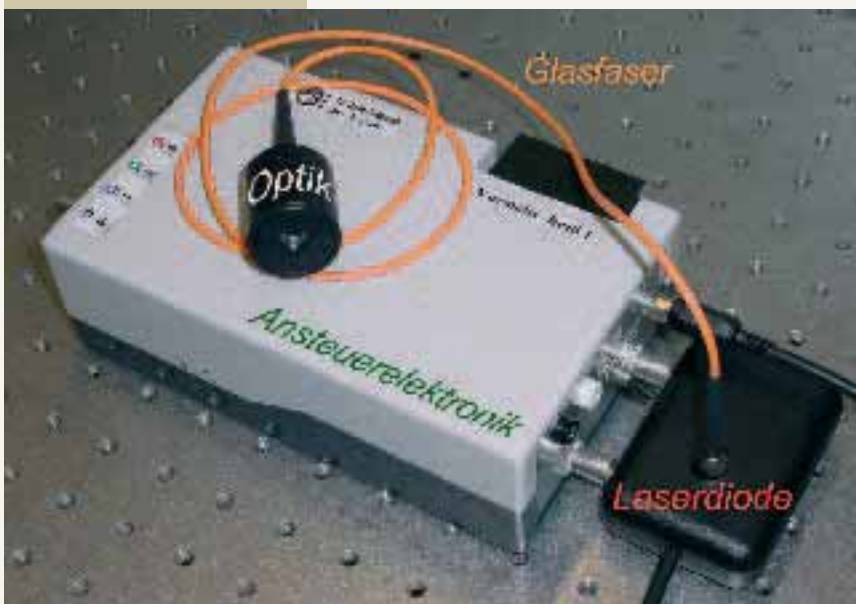


Abbildung 6: Optoelektronisches Sendermodul, bestehend aus Laserdiode mit Glasfasern und Strahlformungsoptik sowie einer Ansteuerelektronik für die Laserdiode.

Problemfaktor Wärme

Es ist zu erkennen, dass für kurzzeitige Bestrahlungen $t < 3$ s vornehmlich thermische Effekte eine Rolle spielen, während für längere Zeiten $t > 30$ s die photochemischen Effekte dominieren. Die an verschiedenen Punkten angegebenen Werte kennzeichnen die gemessene Erhöhung der Netzhauttemperatur. Das heißt, dass bei langen Expositionszeiten bereits eine geringe Temperaturerhöhung zur Schädigung von Gewebe führt, während für eine kurze Dauer deutlich höhere Temperaturen vertragen werden. Da bei infraroter Einstrahlung keine photochemischen Effekte zu erwarten sind, lässt sich im Diagramm für Langzeitexpositionen (1 Arbeitstag) eine Schädigungsschwelle von 1 W/cm^2 ablesen.

Um die tatsächlichen Temperaturerhöhungen abzuschätzen, wurde ein Wärmeleitungsmodell des Auges entwickelt, das auch die Wärmediffusion beschreiben kann. Es beruht auf einem räumlichen Ansatz der Strahlungsabsorption und Wärmeleitung auf Basis der Wärmetransportparameter von Wasser. Die starke Durchblutung der Aderhaut stabilisiert die Augentemperatur sehr effektiv. So kann eine Bestrahlungsstärke von bis zu 200 mW/cm^2 abgeleitet werden, ohne dass die Augentemperatur um mehr als 1°C ansteigt. Dabei stellt sich bereits nach 10 bis 20 Sekunden ein thermodynamisches Gleichgewicht ein. Eine Extrapolation der im sichtbaren Spektralbereich gemessenen und simulierten Werte auf den Infrarotbereich ergibt, dass bei Bestrahlungsstärken auf der Netzhaut unterhalb von 300 mW/cm^2 keinerlei Schädigung zu erwarten ist.

Optoelektronischer Energiesender

Bei dem neuartigen System zur drahtlosen Energieversorgung eines subretinal platzierten Implantats, das die bislang geschilderten technischen und biologischen Randbedingungen optimal erfüllt, werden erstmals optoelektronische Techniken eingesetzt: Eine fasergekoppelte Laserdiode sendet infrarote Strahlung aus, die über eine spezielle Mikrooptik zum Implantat gelangt, das selbst aus zwei räumlich voneinander getrennten Teilen besteht (Abb. 5).

Das Array aus Mikrophotodioden (MPDA) nimmt ein Bild der Umgebung auf, das von Hornhaut und Linse auf die Retina projiziert wird. Über integrierte Differenzverstärker wird der lokale Bildkontrast verstärkt und an das Nervengewebe (vornehmlich Bipolarzellen) abgegeben. Die Versorgungsspannung zum Betrieb dieses aktiven MPDA wird von einem Array photovoltaischer Zellen (PVZ) geliefert, das in einigen Millimetern

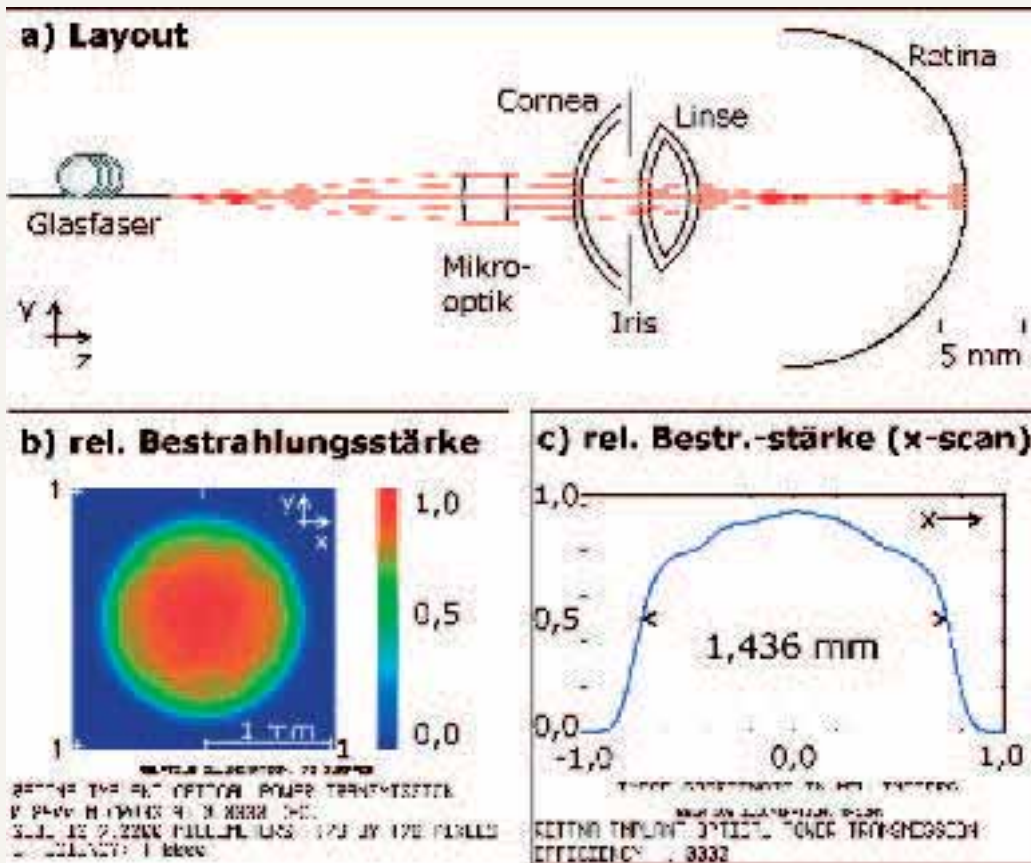


Abbildung 7: Simulation des optischen Strahlverlaufs im menschlichen Auge bei einer Wellenlänge $\lambda = 850 \text{ nm}$ mittels ZEMAX® Ray-Tracing. a) Längsschnitt durch das simulierte 3d-Modell, b) Profil der relativen Bestrahlungsstärke auf der Retina, c) Relative Bestrahlungsstärke auf der Retina als Längsschnitt durch das in b) gezeigte Profil.

Abstand ebenfalls subretinal implantiert und über ein Polyimidbändchen mit integrierten Leitungsstrukturen mechanisch und galvanisch mit dem MPDA verbunden ist.

Herzstück des optoelektronischen Sendermoduls ist eine fasergekoppelte Laserdiode (Siemens, Typ SPL 2F85), deren Emissionswellenlänge bei $\lambda = 850 \text{ nm}$ liegt (Abb. 6). Die Art des Lasers und der Emissionswellenlänge wurden unter folgenden Gesichtspunkten ausgewählt: Laserdioden lassen sich per Batterie betreiben und ermöglichen somit einen mobilen Einsatz. Bei einer Wellenlänge von 850 nm ist eine Vielzahl verschiedener Laserdiodentypen (fasergekoppelt oder freistrahl-optisch und in unterschiedlichen Leistungsklassen) erhältlich. Hinsichtlich der optischen Wellenlänge zeigen Untersuchungen, dass sich für infrarotes Licht im Bereich zwischen 700 nm und 900 nm das Transmissionsmaximum des menschlichen Auges befindet.

Bei der optischen Verbindungstechnik wurde ein fasergekoppeltes System bevorzugt. Dadurch lassen sich Laserdiode und Elektronik leicht räumlich vom Austrittsort der optischen Strahlung trennen. In einem späteren System könnten so Batterien und Elektronik am Gürtel getragen werden, während die Glasfaser an einem Brillengestell zum Auge geführt wird.

Der Glasfaserausgang ist Startpunkt der optischen Übertragungsstrecke. Endpunkt ist der implantierte Energieempfänger. Ziel ist der Entwurf eines miniaturisierbaren Linsensystems, welches die aus der Glasfaser austretende optische Leistung auf dem Energieempfänger im Auge abbildet. Außerdem soll das am Faserende vorherrschende gaußförmige Intensitätsprofil durch die Optik begründet werden.

Mit Hilfe der Software ZEMAX®, einem kommerziellen Strahlverfolgungssystem (*ray-tracing*) zur Simulation optischer Systeme, wurde unter Nutzung der bereits beschriebenen optischen Parameter ein Modell des menschlichen Auges erstellt. Schrittweise wurde nun ein Linsensystem mit den in Abbildung 7 gezeigten Ergebnissen entworfen und simuliert. Auf der Retina bildet sich ein relatives Bestrahlungsstärkeprofil aus, dessen FWHM- (Full width at half maximum = engl. für volle Breite bei halber Höhe)-Durchmesser bei einem im Vergleich zum ursprünglich Gauß'schen Profil homogenen Verlauf $1,436 \text{ mm}$ beträgt.

Eigene Reinraum-Fertigung

Photovoltaische Zellen (PVZ) finden als optoelektronische Leistungskonverter vielfältige Anwendung. Meistens handelt es sich um Solarzellen, die den Betrieb elektrischer Verbraucher unab-



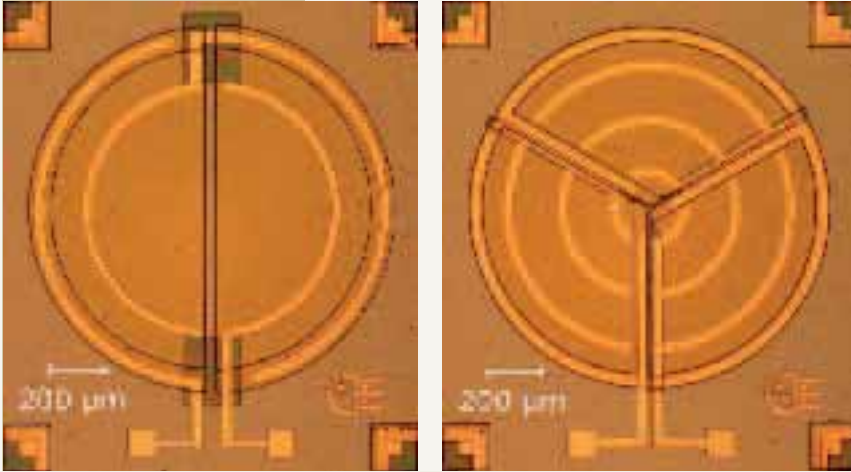


Abbildung 8: Arrays aus photovoltaischen Zellen zur Energieversorgung des Implantats, bestehend aus einer Serienschaltung von zwei Einzelzellen (links) und drei Einzelzellen (rechts).

hängig von einer vorhandenen Infrastruktur gewährleisten. Auch bei Spezialanwendungen, die keine stromführenden metallischen Leitungen erlauben – zum Beispiel in der EMV-Messtechnik oder in explosionsgefährdeten Bereichen – gewinnt die optoelektronische Energieversorgung zunehmend an Bedeutung. Für die PVZ-Entwicklung wurde eine Halbleiterschichtstruktur im direkten Galliumarsenid-System ausgewählt, angepasst und mittels Molekularstrahlepitaxie hergestellt.

Unter Anwendung von CAD-Techniken entstanden zwei verschiedene Varianten kreisrunder Zellen: Eine mit zwei, die andere mit drei in Serie geschalteten Zellen. Mittels Standard-Photolithographie, Ätztechnik und Metallisierungstechnik wurden in den Reinräumen des ZHO (Zentrum für Halbleitertechnik und Optoelektronik) die in Abbildung 8 gezeigten Chips hergestellt. Die Abmessungen von 1,7 mm x 1,5 mm wurden aus implantationstechnischer Sicht von den medizinischen Partnern als Maximum vorgegeben.

Zur Untersuchung der Zellen wurden diese mit definierten optischen Leistungen bestrahlt. Dabei ergab sich für die PVZ mit zwei Zellen ein maxi-

maler Wirkungsgrad von 0,351 (entspricht 35,1%) und für die PVZ mit drei Zellen ein maximaler Wirkungsgrad von 0,224 (entspricht 22,4%). Wie in Abbildung 8 zu erkennen ist, nimmt bei gleicher aktiver Fläche die Metallisierung bei den 3er-PVZ einen höheren Anteil ein als bei den 2er-PVZ. Dies und der größere Serienwiderstand bei den 3er-PVZ führen dazu, dass der Wirkungsgrad geringer ausfällt als bei den 2er-PVZ.

Zukunfts-Vision

Anschließend wurden die auf Grund der besseren Effizienz ausgewählten 2er-PVZ auf ca. 80 µm gedünnt und auf flexible Polyimidbändchen aufgeklebt. Dieser Arbeitsschritt erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Naturwissenschaftlichen und Medizinischen Institut an der Universität Tübingen in Reutlingen. Die elektrische Kontaktierung der im Polyimid integrierten Leiterstrukturen erfolgt dabei mit Hilfe von Leitsilber, das über ein Dispenser-System aufgebracht wird. Die PVZ wurde anschließend mit Silikon verkapselt. Abbildung 9 zeigt je ein Photo des realisierten Implantats in der Aufsicht (a) und von der Seite (b).

Abschließend ist in Abbildung 10 eine Vision des kompletten Systems gezeigt. Die Infrarotleistung der an einem Gürtel zu tragenden Laserdiode mit Batterieversorgung wird über eine optische Faser im Brillengestell ans Auge geführt. Mit Hilfe einer geeigneten Mikrooptik und eines Scanner-Spiegels, der Augendrehbewegungen ausgleicht, wird das Implantat drahtlos mit Energie versorgt. Durch den in der Mikrooptik integrierten Strahlhomogenisierer und die Autofokuseinheit wird dafür gesorgt, dass die Bestrahlungsstärke auf der Netzhaut stets unterhalb 300 mW/cm² bleibt. Somit wird eine zu große thermische Belastung ausgeschlossen.

Die Realisierung eines solchen Retina-Implantat-Gesamtsystems ist aus heutiger Sicht durch die erzielten Fortschritte im Bereich der Neurotechnologie nicht mehr so unrealistisch wie

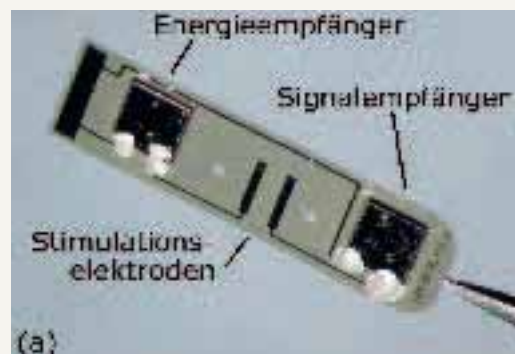


Abbildung 9: a) Aufsicht und b) Seitenansicht eines IR-Implantats mit GaAs-Photoempfängern und Silikonkapselung, Länge 6,5 mm, Breite 2 mm, max. Gesamtdicke 120 µm.



noch vor 10 Jahren. Die Einzelkomponenten sind entwickelt und charakterisiert. Ebenso sind von den klinischen Partnern bereits entsprechende Operationstechniken tierexperimentell erprobt. Bis zu einer Zertifizierung gemäß Medizinproduktegesetz (MPG) und dem Einsatz beim Menschen werden jedoch sicherlich noch einige Jahre vergehen.

Kontakt

Prof. Dr. Dieter Jäger
 Dr.-Ing. Rüdiger Buß
 Dr.-Ing. Andreas Stöhr
 Zentrum für Halbleitertechnik
 und Optoelektronik
 Tel.: 02 03/3 79 - 23 41
 retina-implantat@oe.uni-duisburg.de
 http://www.uni-due.de/oe

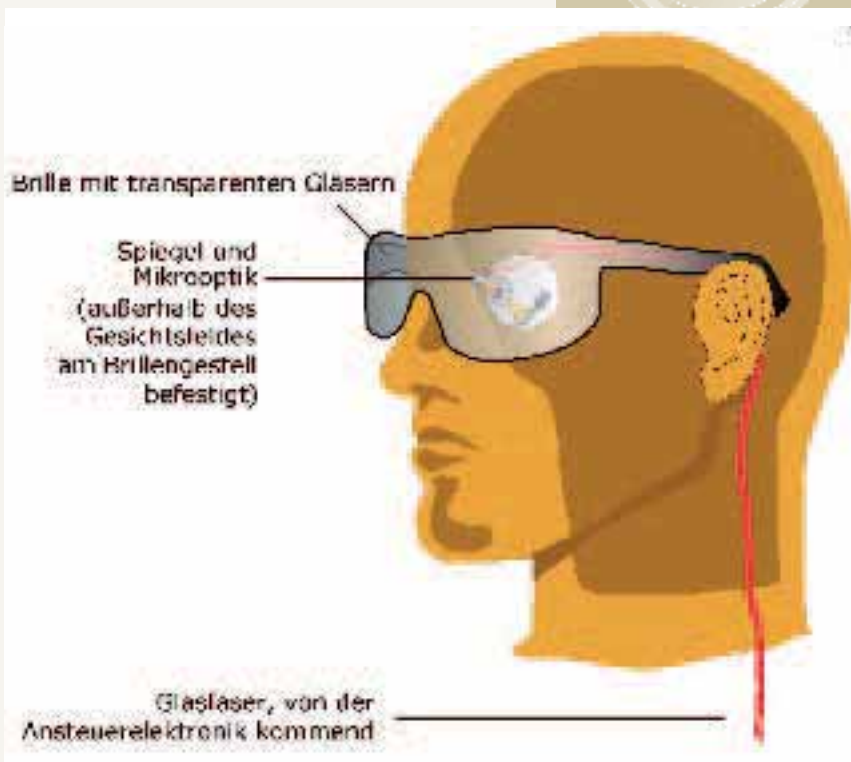


Abbildung 10: Realisierungsvorschlag zur optischen Verbindungstechnik bei der Energieversorgung zukünftiger retinaler Netzhautimplantate.

ANZEIGE

CETECOM™

**CETECOM -
 your successful connection**

Wir prüfen, beraten, entwickeln und zertifizieren weltweit in der Telekommunikation und Informationstechnik.

- Digitaler Mobilfunk (GSM & 3G/LTE)
- Feldtests und Network Monitoring
- Funk- und Satellitentechnik
- Drahtgebundene Kommunikation
- EMV, SAR & OTA Performance Testing
- Smart Card Terminals
- Internationales Zulassungshandling
- Certification Body

www.cetecom.com

Handwerker kennen ihr wichtigstes Werkzeug.



Wir verstehen das. Deshalb bieten wir die **IKKimpuls-Gesundheitskurse** an. Denn obwohl man sich als Handwerker viel bewegt, macht erst die richtige Kombination aus Muskelkräftigung, Ausdauertraining und Entspannung rundum fit. Jetzt anrufen oder vorbeikommen und informieren!

Schnell und nah fürs Handwerk da.
 24 Stunden erreichbar: 018 02/31 32 72 (0,06 €/Anruf)
 oder www.ikk-nordrhein.de

Die Krankenkasse, die ihr Handwerk versteht.

