

# 1 Einleitung

Die optische Übertragungstechnik umfasst das Gebiet der Übertragung von Signalen und Energie auf optischem Weg, eine Übertragung, die entweder durch den freien Raum oder durch Wellenleiter erfolgen kann.

Die optische Signalübertragung als Freiraum-Übertragung gab es schon im Altertum: In der Tragödie 'Agamemnon' des griechischen Dichters Aischylos wird beschrieben, wie die Nachricht des Falls Trojas durch eine Feuerkette bis nach Athen übertragen wurde. Ende des 18. Jahrhunderts wurde dann die optische Telegraphie erfunden, bei der die Signale mittels sogenannter Semaphoren, die aus beweglichen Holzbalken bestanden, von einer Telegraphenstation zur nächsten übermittelt wurden [1]. Dieses System war in ganz Europa verbreitet, allein das französische Netz umfasste zeitweise eine Länge von 4800 km. Die Übertragungsgeschwindigkeit, die mit dieser Technik erreicht wurde, betrug etwa 20 Zeichen pro Minute. Die optische Übertragung wurde Mitte des 19. Jahrhunderts wegen der höheren Geschwindigkeiten, die damit erreicht werden konnten, durch die elektrische Telegraphie ersetzt. Optische Verfahren wurden danach für etwa 100 Jahre kaum verwendet. Dies änderte sich erst um das Jahr 1970, als mit der Laserdiode [2,3] und der niedrigdämpfenden Glasfaser [4] zwei Werkzeuge für die Entwicklung der hoch bitratigen optischen Übertragung in der Weitverkehrstechnik bereitstanden [5,6]. Wesentliche Vorteile gegenüber der bis dahin verwendeten elektrischen Übertragung durch Kupferleitungen sind neben der viel größeren Übertragungskapazität das geringere Gewicht der Glasfasern sowie die Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Feldern. Der letzte Punkt beinhaltet auch die Tatsache, dass sich zwei benachbarte Übertragungskanäle nicht gegenseitig beeinflussen, was sowohl für die wellenleitergebundene Übertragung, als auch für die Freiraum-Übertragung gilt. Dies ermöglicht eine massive Parallelisierung bei der optischen Übertragungstechnik. Der Trend geht hier in den letzten Jahren zu immer kürzeren Übertragungstrecken, bis hin zu board-to-board- und chip-to-chip-Verbindungen. Diese Verbindungen im Dezimeter- und Zentimeterbereich werden sowohl wellenleitergebunden [7,8], als auch freistrahloptisch [9-11] realisiert. Ein großer Vorteil bei der freistrahloptischen Verbindung ist die Tatsache, dass keine Verbindung zwischen Sender und

Empfänger durch Drähte oder Glasfasern besteht. Damit werden Verbindungen zwischen frei beweglichen Bauteilen, z.B. bei der Satellitenkommunikation [12,13], bei IR-Fernbedienungen und bei IrDA-Schnittstellen<sup>1</sup> [14,15], oder durch physikalische Barrieren, z.B. in das Auge zu einem medizinischen Implantat (wie in dieser Arbeit: [16,E10,E11]) und zu einem Sensor in einem Kryostaten [17] möglich. In Übersichtswerken zur optischen Signalübertragung [17-19] sind neben den Grundlagen auch viele Anwendungen enthalten.

Die optische Energieübertragung (remote optical powering) ist gegenüber den oben angeführten Übertragungsarten relativ neuartig, sie wurde erstmalig 1978 erwähnt [20]. Als Übertragungsmedium werden häufig Glasfasern verwendet, die von den optischen Signalübertragungssystemen schon zur Verfügung stehen. Anwendungen hierfür sind z.B. entferntes Schweißen und entfernte thermische Aktivierung [21,22], Versorgung von elektrischen Geräten oder Sensoren mit Energie [23-29] und medizinische Anwendungen [30]. Neben den Glasfasern werden auch hohle Plastikfasern mit Metallbeschichtung für den Transport von langwelligem Laserlicht, z.B. eines CO<sub>2</sub>-Lasers (Wellenlänge  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ ) verwendet [31,32]. Als Lichtquellen werden neben Laserdioden [21,24-26] auch Festkörperlaser [21], Gaslaser [30] und Weißlichtquellen [23] eingesetzt. Folgende Vorteile gegenüber konventioneller Energieübertragung mit Metalldrähten sind zu nennen: Der wichtigste Punkt ist die elektrische Isolation der Energiequelle vom Verbraucher, wodurch Potentialfreiheit erlangt wird und zerstörerische Stromstöße über die Verbindungsleitung verhindert werden. Dadurch, dass keine Gefahr der Funkenbildung besteht, ist die optische Energieübertragung auch für korrosive und explosionsgefährdete Umgebungen geeignet. Außerdem gilt, wie für die Signalübertragung, dass sich die Wellenleiter durch ihr geringes Gewicht und ihre hohe Flexibilität auszeichnen. Auch für die freistrahloptische Energieübertragung gibt es einige Anwendungsfelder: Für lange Reichweiten könnten z.B. Satelliten von Bodenstationen aus optisch mit Energie versorgt werden, wenn sie sich im Erdschatten befinden [33]. Die Solarzellen, die sonst das Sonnenlicht konvertieren, werden in diesem Fall als Empfänger für die Energieübertragung verwendet. Bei kurzen Entfernungen ist die

---

<sup>1</sup> IrDA steht für 'Infrared Data Association'. Dies ist die Bezeichnung für ein Datenübertragungsformat zwischen elektronischen Geräten, wie Notebooks, Drucker, Mobiltelefonen u.ä.

optische Energieversorgung von medizinischen Implantaten eine Anwendung [16,34]. Ein anderes Feld ist die Energieübertragung in smart pixel arrays [35-38]. Der Vorteil der optischen Energieversorgung der einzelnen smart pixel gegenüber der konventionellen Technik über Drähte auf den Chips, liegt zum einen im reduzierten Übersprechen zwischen den Einheiten, zum anderen im vereinfachten Layout der Pixel.

Dies zeigt, dass die optische Übertragungstechnik sowohl bei der Signalübertragung, als auch bei der Energieübertragung auf verschiedenen Gebieten Vorteile gegenüber der elektrischen Übertragung bietet. Einige wichtige Anwendungen sind in der Tabelle 1.1 zusammengefasst.

	Freiraum-Übertragung	Wellenleiter-Übertragung
Signal	<ul style="list-style-type: none"> <li>- IR-Fernbedienung</li> <li>- IrDA-Schnittstellen</li> <li>- Satellitenkommunikation</li> <li>- Kommunikation mit einem medizinischen Implantat</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Wide Area Network (WAN)</li> <li>- Backbones</li> <li>- Metropolitan Area Network (MAN)</li> <li>- Local Area Network (LAN)</li> </ul>
Energie	Versorgung von: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Smart pixel</li> <li>- Medizinischen Implantaten</li> </ul>	Versorgung von: <ul style="list-style-type: none"> <li>- Entferntes Schweißen</li> <li>- Elektrischen Geräten</li> <li>- Sensoren</li> </ul>

*Tabelle 1.1: Anwendungsfelder der optischen Übertragungstechnik.*

In dieser Tabelle ist eine Anwendung enthalten, die im Rahmen dieser Arbeit bearbeitet wurde: Die Versorgung von medizinischen Implantaten mit Signalen und Energie. Die hier beschriebene Übertragungsstrecke wurde für ein Netzhaut-Implantat entwickelt. Dies ist ein Implantat, das Patienten, die an einer Netzhautdegeneration erkrankt sind, ein gewisses Maß an Sehfähigkeit zurückgeben soll [39,40]. Bei diesem Krankheitsbild sterben die Photorezeptoren (Stäbchen und Zapfen) im Auge allmählich ab, während der Rest der Netzhaut, insbesondere die Ganglienzellen, welche die äußerste Nervenzellschicht bilden, weitest-

gehend intakt bleiben [41]. Eine Sehprothese mit epiretinalem<sup>2</sup> Netzhaut-Implantat besteht aus drei Haupteinheiten:

1. Dem Retina-Encoder (RE). Dies ist eine Einheit zur Bildaufnahme und Bilddatenprozessierung, die außerhalb des Auges untergebracht ist. Der RE besteht aus einer Pixelkamera und einem künstlichen neuronalen Netzwerk für die Bilddatenprozessierung.
2. Dem Retina-Stimulator (RS). Dies ist ein Implantat, das auf der Netzhaut befestigt wird. Es besteht aus einer flexiblen Folie, auf der ein Signal- und Energieempfänger, Stimulationselektroden zur Reizung der Nervenzellen, sowie eine elektronische Schaltung zur Ansteuerung der Stimulationselektroden untergebracht sind. Diese Struktur ist in biokompatibles Silikon eingehüllt.
3. Einer Signal- und Energieübertragungsstrecke vom Retina-Encoder zum Retina-Stimulator.

Das Funktionsprinzip dieses Systems wird im Folgenden näher erläutert: Zunächst wird von der Pixelkamera ein Bild erzeugt. Dieser Datensatz wird vom künstlichen neuronalen Netz reduziert und in Signale umgerechnet, mit denen die Ganglienzellen angesprochen werden können. Dieser Vorgang entspricht der Datenreduktion von den etwa 120 Millionen Photorezeptoren zu den etwa 1 Million Ganglienzellen in der menschlichen Netzhaut. Diese Signale werden zum Retina-Stimulator gesendet, zusammen mit der Energie, die zum Betrieb der elektrischen Schaltungen und Stimulationselektroden benötigt wird. Dieses kann sowohl optisch, als auch über induktive Kopplung von Spulen realisiert werden. Im Retina-Stimulator werden die Stimulationselektroden angesteuert, die ein Reizmuster in die Ganglienzellschicht übertragen. Diese leiten die Signale dann über den Sehnerv in die Sehrinde des Gehirns weiter, wo ein Sehindruck entsteht.

---

<sup>2</sup> Epiretinal bedeutet: Auf der Netzhaut liegend. Das Implantat wird auf der Seite der Netzhaut befestigt, wo sich die Ganglienzellschicht befindet.

Mit dem Ziel, eine solche Sehprothese zu entwickeln, wurde von R. Eckmiller (Universität Bonn) das Projekt: 'Retina Implant (EPI-RET)' initiiert. In diesem, vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt (8/1995-2/2000), wurden 14 Forschergruppen aus den Disziplinen Neuroinformatik, Mikroelektronik, Optoelektronik und Medizin zusammengeführt.

Das Ziel der hier vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer optischen Signal- und Energieübertragungsstrecke zur Versorgung eines Netzhautimplantates im Rahmen dieses interdisziplinären Projektes. Die optische Übertragung weist dabei gegenüber der induktiven Übertragung, wie weiter oben schon erwähnt, einige Vorteile auf: Mit kleinen, sehr leichten Bauteilen lassen sich hochbitratige Übertragungsstrecken aufbauen, die sehr störsicher gegenüber äußeren Beeinflussungen sind. Die Arbeiten wurden in Kooperation mit den Verbundpartnern des Retina-Implant-Projektes durchgeführt, besonders die enge Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme (FhG-IMS) in Duisburg, dem Fraunhofer-Institut für Biomedizinische Technik (FhG-IBMT) in St. Ingbert und der Universitäts-Augenklinik an der GH Essen sind hier hervorzuheben.

Im Kapitel 2 dieser Arbeit wird das Konzept einer Sehprothese vorgestellt, sowie die Aufgabenstellung und das Realisierungskonzept für die optische Übertragungsstrecke zur Versorgung eines Netzhautimplantates dargelegt.

Im Kapitel 3 werden Modelle und Simulationstechniken behandelt, mit denen optische Übertragungsstrecken beschrieben werden können. Aufgeteilt in die drei Abschnitte, Signalübertragung, Energieübertragung und simultane Signal- und Energieübertragung werden die Bestandteile einer Übertragungsstrecke näher behandelt: Die Funktion einer Senderschaltung zur Ansteuerung eines elektro-optischen Senders wird durch Simulationen verdeutlicht. Danach werden die Eigenschaften von Übertragungsmedien für die Freiraum-Übertragung beschrieben. Auf der Empfängerseite werden dann die Eigenschaften von optoelektronischen Wandlern (Photodioden, photovoltaische Zellen) näher untersucht sowie Empfängerschaltungen anhand von Simulationen behandelt.

Im Kapitel 4 werden die Messanordnungen näher vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut wurden und mit denen die hier vorgestellten experimentellen Ergebnisse erzielt wurden.

Das Kapitel 5 befasst sich mit der Entwicklung und Realisierung der Komponenten zum Aufbau einer optischen Signal- und Energieübertragungsstrecke für den Einsatz in einer Sehprothese. Dabei werden die experimentellen Ergebnisse vorgestellt, die mit den einzelnen Komponenten erzielt wurden.

Im Kapitel 6 wird der Einbau der optischen Übertragungsstrecke in eine Sehprothese, sowie die hiermit erzielten experimentellen Ergebnisse beschrieben.

Eine Zusammenfassung dieser Arbeit erfolgt im Kapitel 7.