

## 7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der optischen Signal- und Energieübertragung unter der Zielsetzung der Entwicklung und Realisierung einer Übertragungsstrecke für den Einsatz in einer Sehprothese. Die Arbeit besteht aus zwei Hauptabschnitten: Nach der Einleitung und der Vorstellung der Aufgabenstellung in den Kapiteln 1 und 2 werden im ersten Teil (Kapitel 3) die Grundlagen der optischen Signal- und Energieübertragung behandelt. Es werden Modelle für die hierfür benötigten Komponenten erläutert, sowie optische und elektronische Simulationstechniken für die Bauteilentwicklung vorgestellt. Im zweiten Teil der Arbeit (Kapitel 4 bis 6) wird die Entwicklung und Realisierung einer optischen Signal- und Energieübertragungsstrecke im Rahmen des BMBF-Projektes 'Retina-Implant (EPI-RET)' beschrieben.

Im Kapitel 2 wird das Konzept einer Sehprothese vorgestellt. Danach werden die Aufgabenstellung und ein Realisierungskonzept für den Aufbau der Übertragungsstrecke beschrieben. Ziel ist die gleichzeitige Übertragung von Signalen bei einer Datenrate von bis zu 200 kbit/s und die Bereitstellung von mindestens 5 mW elektrischer Leistung am Empfänger. Dabei muss dieser Empfänger so klein sein, dass er in ein Netzhautimplantat eingebaut werden kann. Weiterhin darf die optische Intensität auf der Netzhaut einen Wert von etwa 1 W/cm<sup>2</sup> nicht übersteigen, um keine thermischen Schädigungen zu verursachen.

Das Kapitel 3, in dem es um die Modellbildung und Simulationstechniken für die optische Signal- und Energieübertragung geht, ist in drei Abschnitte aufgeteilt, in denen die drei Funktionsblöcke einer Übertragungsstrecke 'Sender', 'Übertragungsmedium', und 'Empfänger' jeweils für die Signalübertragung, die Energieübertragung und die simultane Signal- und Energieübertragung eingehend behandelt werden:

### 1. Signalübertragung

Hier wird das Funktionsprinzip einer Senderschaltung für die optische Signalübertragung vorgestellt, die mit direkter Modulation einer Laserdiode arbeitet. Mit Hilfe eines Simulationsprogramms zur Netzwerkanalyse (SPICE)

wird aus diesem Funktionsprinzip eine Schaltung entwickelt, die für die Signalübertragung bei einer Datenrate von 200 kbit/s geeignet ist. Diese Schaltung wird dann dahingehend erweitert, dass sie auch für die gleichzeitige Übertragung eines Taktsignals geeignet ist.

Um das Verhalten des vom Sender abgestrahlten Laserlichtes im Übertragungsmedium bei der freistrahloptischen Übertragung zu verstehen, wird das Ausbreitungsverhalten eines Lichtstrahls mit gaußscher Intensitätsverteilung vorgestellt. Dabei wird festgestellt, dass bei Ausbreitungslängen im Zentimeterbereich das Modell der geometrischen Optik noch anwendbar ist. Daraufhin wird mit der Strahlverfolgung (ray tracing) eine Simulationstechnik vorgestellt, die auf geometrischer Optik basiert. Hiermit kann das Übertragungsverhalten bei Einstrahlung in ein Auge simuliert werden.

Danach werden zwei wesentliche Kenngrößen einer Photodiode, die als Photoempfänger in der optischen Übertragungstrecke eingesetzt wird, definiert und näher erläutert, die Bandbreite und das Signal/Rausch-Verhältnis. Für die Berechnung dieser Größen werden Formeln angegeben, welche die Grundlage für das Design von Signalempfängern bilden. Dann wird das Funktionsprinzip einer Empfängerschaltung für die optische Signalübertragung dargelegt und Simulationen dieser Schaltung vorgestellt. Die Schaltung ist für den gleichzeitigen Empfang von Daten- und Taktsignalen bei einer Datenrate von 200 kbit/s ausgelegt, passend zu der weiter vorne vorgestellten Senderschaltung.

## 2. Energieübertragung

Nachdem die Anforderungen an eine Senderschaltung für die Energieübertragung (Einstellbarer Konstantstrom, Schutz der Laserdiode) festgestellt sind, wird ein Schaltungskonzept als Blockschaltbild, sowie die Umsetzung dieses Konzeptes in eine konkrete Schaltung vorgestellt. Durch Simulationen wird die Funktion dieser Schaltung überprüft und festgestellt, dass sie die oben angegebenen Anforderungen erfüllt. Danach werden die Transmissionseigenschaften von Augengewebe behandelt. Anschließend werden die Eigenschaften von photovoltaischen Zellen beschrieben, die als Empfänger für die Energieübertra-

gung eingesetzt werden. Damit liegen alle notwendigen Modelle für das Design einer Energieübertragungsstrecke vor.

### 3. Simultane Signal- und Energieübertragung

Hier wird ein Modell für die simultane Signal- und Energieübertragung vorgestellt, das auf den in den vorherigen Abschnitten beschriebenen Systemen basiert.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wird die Entwicklung und Realisierung einer optischen Signal- und Energieübertragungsstrecke für den Einsatz in einer Sehprothese vorgestellt: Es wurde eine Übertragungsstrecke mit einem miniaturisierten Empfänger entwickelt, die bei Signalübertragungsraten von 56 kbit/s bis 224 kbit/s getestet wurde und eine Leistung von über 20 mW bereitstellen kann. Das System besteht aus mehreren Komponenten mit den folgenden Eigenschaften: Die Senderschaltung stellt für die Ansteuerung der Laserdiode einen frei einstellbaren Strom bis zu 980 mA zur Verfügung, der mit Daten- und Taktsignalen moduliert werden kann. Die Strahlformungsoptik stellt die Signal- und Energieübertragung auch bei Augendrehungen sicher: Ist der Empfänger auf der Netzhaut platziert, bis zu Augendrehungen von  $10^\circ$ , bei einem Empfänger in einer intraokularen Linse bis zu einem Winkel von  $20^\circ$ . Der optoelektronische Empfänger besteht aus einer Photodiode für den Signalempfang und einem Array aus photovoltaischen Zellen für den Energieempfang, die auf einem Halbleitersubstrat monolithisch integriert wurden. Für die Grenzfrequenz (Bandbreite) der Photodiode wurde ein Wert von über 150 MHz gemessen, während mit einzelnen photovoltaischen Zellen folgendes erreicht wurde: Eine Leerlaufspannung von  $U_{oc} = 1,1$  Volt, ein Füllfaktor von  $FF = 0,82$  und ein Leistungswirkungsgrad von  $\eta = 40,8$  %. Die entsprechenden Werte für PVZ-Arrays, bestehend aus zwölf photovoltaischen Zellen in einer Serienschaltung sind  $U_{oc} = 12,6$  Volt,  $FF = 0,66$  und  $\eta = 31,5$  %. Die maximale, von einem PVZ-Array erzeugte elektrische Leistung beträgt 26,5 mW. Für die Abgabe von 5 mW wird für einen Empfänger auf der Netzhaut eine optische Intensität von  $1,2$  W/cm<sup>2</sup> benötigt, womit der Richtwert annähernd erreicht wird. Bei einem Empfänger in einer intraokularen Linse sinkt die benötigte Intensität auf  $0,11$  W/cm<sup>2</sup>. Die Empfängerschaltung wurde als CMOS-ASIC entwickelt. Bei einer Verlustleistung von nur

1,2 mW ist sie in der Lage aus dem Signal einer Photodiode die Daten und den Takt bei einer Datenrate von 56 kbit/s bis 224 kbit/s zu rekonstruieren.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass damit eine Übertragungsstrecke für die simultane Signal- und Energieübertragung für den Einsatz in einer Sehprothese vorliegt. Die gesteckten Ziele, bezüglich der Datenrate und der bereitzustellenden elektrischen Leistung wurden erreicht. Mit diesem System ist es nun möglich, ein Netzhautimplantat aufzubauen und experimentell zu testen.