

6 Simultane Signal- und Energieübertragung

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

6.1 Einbau in ein Netzhaut-Implantat Gesamtsystem

Nachdem alle Komponenten, die für den Aufbau der optischen Signal- und Energieübertragungsstrecke gebraucht werden, gefertigt und getestet waren, wurde das Gesamtsystem aufgebaut und experimentell untersucht: Die Sendereinheit ist nicht miniaturisiert und wurde als feststehender Messplatz aufgebaut (siehe Abschnitt 4.3). Die Empfangseinheit wurde in ein Modul eingebaut, Retina-Stimulator (RS) genannt, das für die Implantation in ein Auge konzipiert wurde. Von diesem Retina-Stimulator wurden mehrere Ausführungen realisiert, die im weiteren näher beschrieben werden. Dabei ist zu beachten, dass für alle RS-Ausführungen die gleiche Empfangseinheit für die optische Signal- und Energieübertragung verwendet wurde. Gemeinsam ist allen Ausführungen, dass die aktiven Bauelemente (Halbleiterchips und SMD-Bauteile) auf einem flexiblen Polyimid-Substrat, in das elektrische Verbindungen integriert sind, befestigt werden¹ und die gesamte Struktur vor dem Implantieren in eine biokompatible Silikonhülle vergossen wird².

In Abb. 6.1 sind die zwei realisierten Ausführungen des Systems 1 (siehe auch Abb. 2.2(a)), bei denen der Empfänger in einer intraokularen Linse (IOL) untergebracht ist, ohne biokompatible Silikonumhüllung dargestellt. Die beiden Ausführungen unterscheiden sich durch die verschiedenen Stimulationselektroden, in der Abbildung jeweils am unteren Ende der RS-Struktur zu erkennen. In der einen Ausführung (Abb. 6.1(a)) sind die Elektroden in den Polyimidträger inte-

¹ Die Herstellung der Polyimid-Substrate und der Zusammenbau der RS-Strukturen wurde im FhG-IBMT, St. Ingbert durchgeführt.

² Die biokompatible Verhüllung wurde im Institut für Pathologie der RWTH Aachen entwickelt.

griert, in der anderen Ausführung (Abb. 6.1(b)) befinden sie sich auf einer Silizium-Membran³. Darüber ist die Stimulationselektronik zu sehen und am oberen Ende des Substrats, das in die IOL eingegossen wird, sind der Signal- und Energieempfänger, die Empfangselektronik und zwei SMD-Bauteile zu erkennen. Dies ist zum einen der Lastwiderstand, an den die Photodiode (Signalempfänger) angeschlossen ist (SMD-Widerstand), zum anderen der Pufferkondensator, der den vom PVZ-Array (Energieempfänger) gelieferten Strom glättet (SMD-Kondensator).

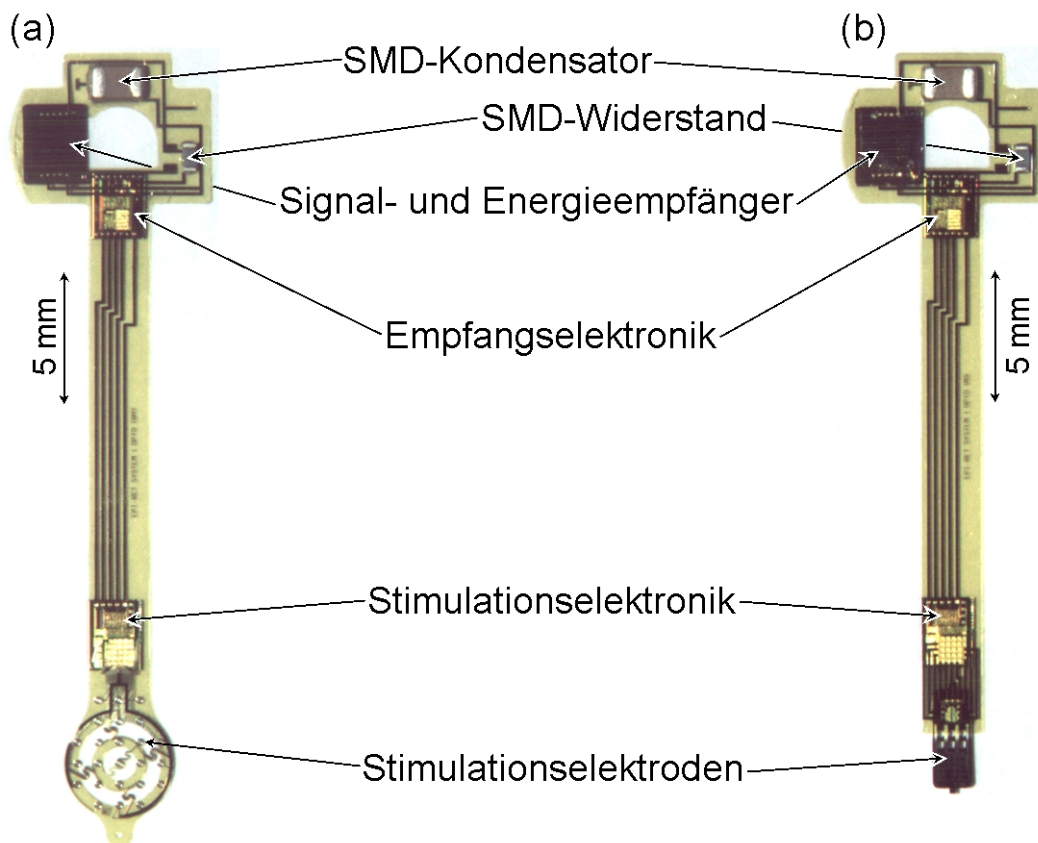


Abbildung 6.1: Retina-Stimulator-Strukturen des Systems 1 mit integrierter Signal- und Energieempfangereinheit. (a) Ausführung mit Stimulationselektroden des FhG-IBMT, (b) Ausführung mit Stimulationselektroden des FhG-IMS.

Auch vom System 2 (siehe auch Abb. 2.2(b)) wurden zwei Ausführungen mit den beiden Elektrodentypen hergestellt, zu sehen in Abb. 6.2 (Elektrodentyp FhG-IBMT) und Abb. 6.3 (Elektrodentyp FhG-IMS). Im Teilbild (a) ist jeweils die Seite zu sehen, die der Netzhaut zugewandt ist, im Teilbild (b) jeweils die der Netzhaut abgewandten Seite. Elektrische Verbindungen und Funktionsweise

³ Herstellung im FhG-IMS, Duisburg.

der aktiven Bauelemente entsprechen denen bei System 1 (s.o.). Das Polyimid-Substrat wurde zwischen dem Signal- und Energieempfänger und dem SMD-Widerstand um 180° gebogen, damit das Implantat nicht zu groß für die Befestigung auf der Netzhaut wird. Damit befindet sich nur der Signal- und Energieempfänger auf der netzhautabgewandten Seite.

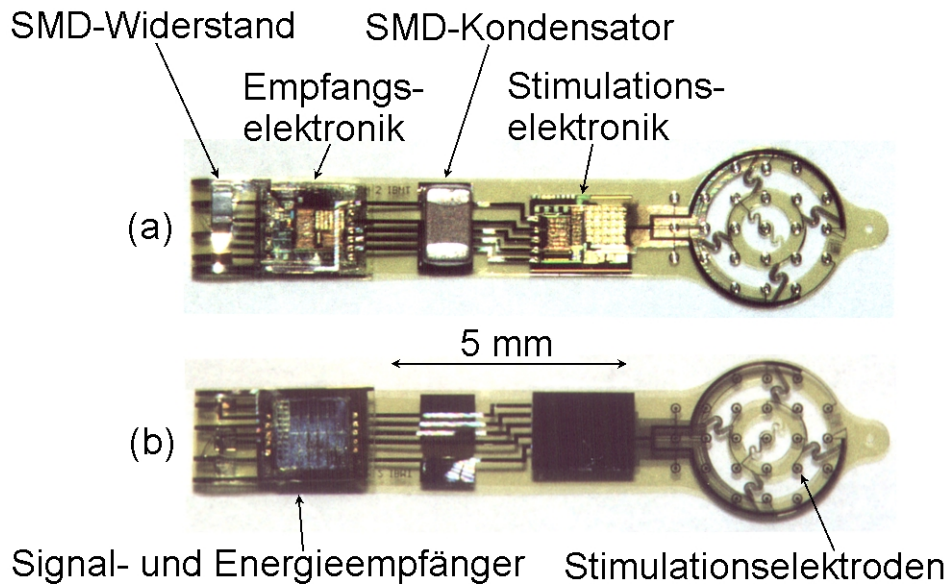


Abbildung 6.2: Retina-Stimulator-Strukturen des Systems 2 mit integrierter Signal- und Energieempfängereinheit, Ausführung mit Stimulationselektroden des FhG-IBMT. (a) netzhautzugewandte Seite, (b) netzhautabgewandte Seite.

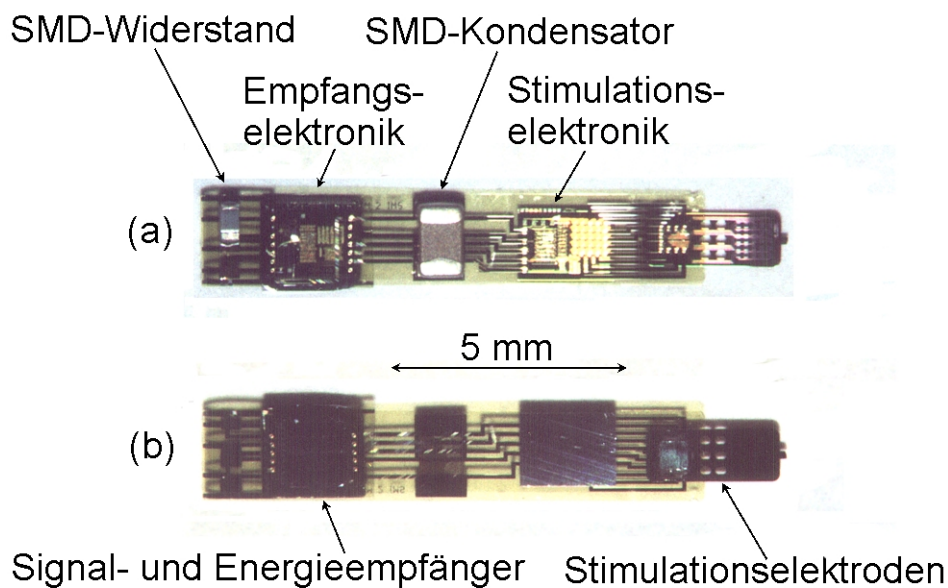


Abbildung 6.3: Retina-Stimulator-Strukturen des Systems 2 mit integrierter Signal- und Energieempfängereinheit, Ausführung mit Stimulationselektroden des FhG-IMS. (a) netzhautzugewandte Seite, (b) netzhautabgewandte Seite.

6.2 Experimentelle Ergebnisse

Die im folgenden vorgestellten experimentellen Ergebnisse zur simultanen Signal- und Energieübertragung wurden mit RS-Strukturen des Systems 1 (Retina Gesamtsystem System 1 OPTO IBMT Nr. 67 und Nr. 68) gewonnen. Der Signalempfänger besteht bei diesen Strukturen aus drei (Nr. 67) bzw. fünf (Nr. 68) in Serie geschalteten Photodioden. In der Abb. 6.4 sind in einer Übersicht die Messpunkte gezeigt, an denen Signale gemessen wurden. An den beiden Elektroden des Pufferkondensators befinden sich die beiden Messpunkte 'gnd' und 'vdd10V'; 'gnd' ist die gemeinsame Masse, die als Referenz für Spannungsmessungen an den anderen Messpunkten verwendet wird, am Messpunkt 'vdd10V' kann die vom PVZ-Array bereitgestellte Spannung gemessen werden. Das Ausgangssignal der Photodiode, welches dem Signal am Dateneingang 'dataopto' der Empfängerschaltung entspricht, wird an der nicht auf Masse liegenden Elektrode des SMD-Widerstands gemessen. Die von der Empfängerschaltung rekonstruierten Daten- und Taktsignale werden an den Messpunkten 'dataaus (analog)' und 'taktaus (analog)', direkt an der Empfangselektronik gemessen, zur Messung des von der Digitalschaltung weiterverarbeiteten Taktes wird der Messpunkt 'taktaus (digital)' an der Stimulationselektronik kontaktiert.

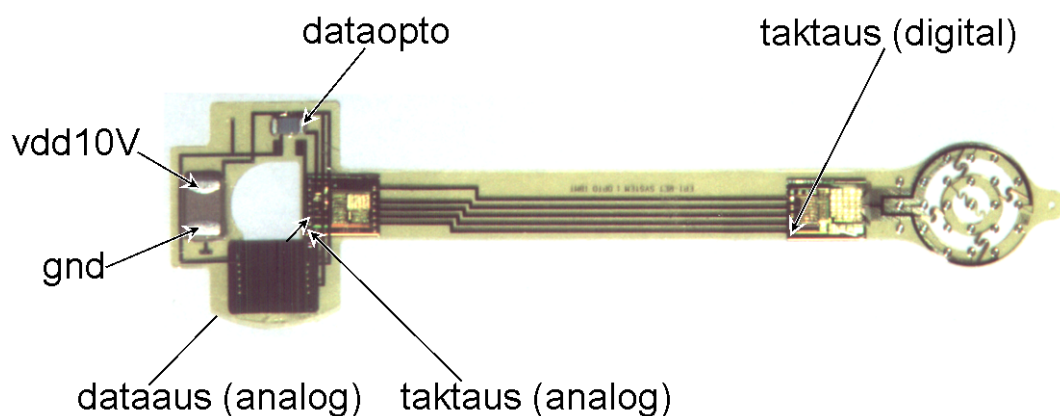


Abbildung 6.4: Übersicht über die Messpunkte, an denen die in diesem Abschnitt dargestellten Signalverläufe gemessen wurden.

Für die in den Abb. 6.5 bis 6.7 dargestellten Messungen gelten folgende Gemeinsamkeiten: Die verwendete RS-Struktur ist die Nr. 67 (s.o), die von der Laserdiode abgestrahlte optische Leistung beträgt 85 mW und die vom PVZ-Array bereitgestellte Spannung (unter Last) ist $U_{PVZ} = 9,7$ Volt. Die Signale

wurden mit einer Datenrate von 56 kbit/s, der Takt mit der achtfachen Frequenz (448 kHz) übertragen. Die Messwerterfassung erfolgte in diesen Fällen nicht rechnergestützt (siehe Abb. 4.3) sondern durch Ausgabe des Oszilloskop-Bildschirminhaltes auf einem Plotter. Die Kurve (1) in den Diagrammen stellt jeweils den zeitlichen Verlauf der Ausgangsspannung U_{LD} der Senderschaltung dar. Beim Ablesen der Spannungen bei den Kurven (2) muss beachtet werden, dass durch die Verwendung eines 10:1 Oszilloskop-Tastkopfes die gemessenen Spannungen nur 1/10 der an den Messpunkten anliegenden Werte betragen. Die Einteilung der x-Achse beträgt jeweils 5 μ s pro Unterteilung, die Einteilung und der Offset der y-Achse ist jeweils in den Abbildungen angegeben. In der rechten unteren Ecke (Überschrift: 'Measurements') sind immer die vom Oszilloskop errechneten Anstiegs- (risetime) und Abfallzeiten (falltime) der unteren Signalverläufe zu sehen. Diese Messungen stellen den Verlauf der übertragenen Daten- und Taktsignale in der Übertragungsstrecke dar.

In Abb. 6.5 ist neben U_{LD} der zeitliche Verlauf der Spannung am Eingang der Empfängerschaltung 'dataopto' dargestellt. Die maximale Ausgangsspannung liegt bei 1,8 Volt, bei drei in Serie geschalteten Photodioden also im Mittel 600 mV pro Photodiode (vgl. Abschnitt 5.4). Die von der Photodiode an die Empfängerschaltung gelieferte Spannung entspricht in ihrem zeitlichen Verlauf, bis auf eine geringfügige Verbreiterung der Taktpulse, dem gesendeten Signal.

In der nächsten Messung (Ergebnisse in Abb. 6.6) wurde neben U_{LD} das rekonstruierte Datensignal am Ausgang 'dataaus (analog)' der Empfängerschaltung gemessen. Das Datensignal hat eine Amplitude von 6 Volt und die Anstiegs- und Abfallzeiten zwischen 'high'-Pegel und 'low'-Pegel betragen etwa 100 ns.

In der dritten Messung (Abb. 6.7) wurden schließlich U_{LD} und das rekonstruierte Taktsignal am Ausgang 'taktaus (analog)' der Empfängerschaltung gemessen. Hier wird deutlich, dass neben den Daten auch der Takt erfolgreich übertragen wird, die Übertragungsstrecke also ihre Funktion erfüllt. Das Taktsignal hat, wie das Datensignal, eine Amplitude von 6 Volt, die Anstiegs- und Abfallzeiten sind mit 200 bis 300 ns etwas länger als bei den Datensignalen.

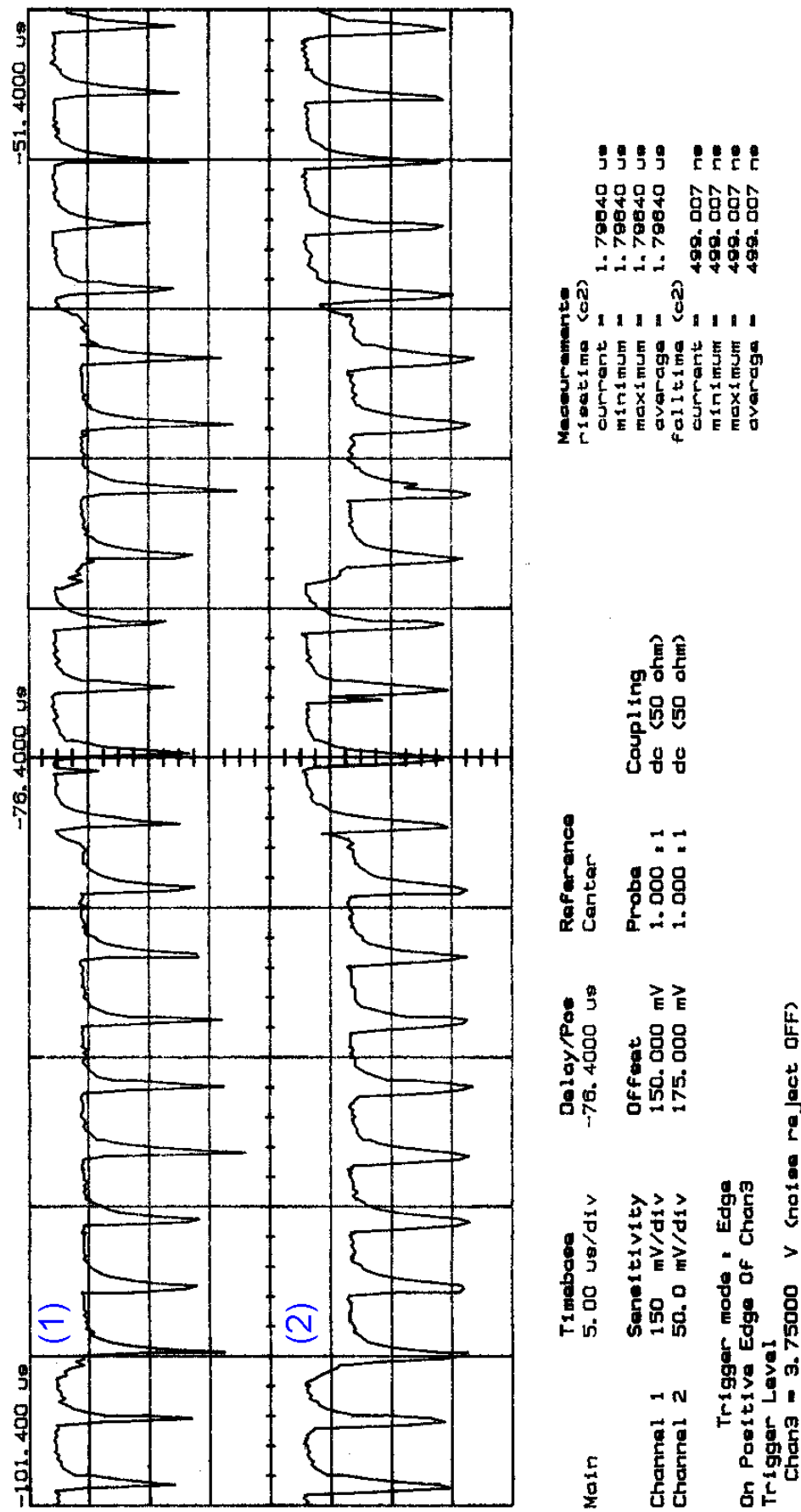


Abbildung 6.5: Gemessene Signalverläufe am Ausgang der Senderschaltung (Kurve (1)) und am Messpunkt 'dataopto' (Kurve (2)).

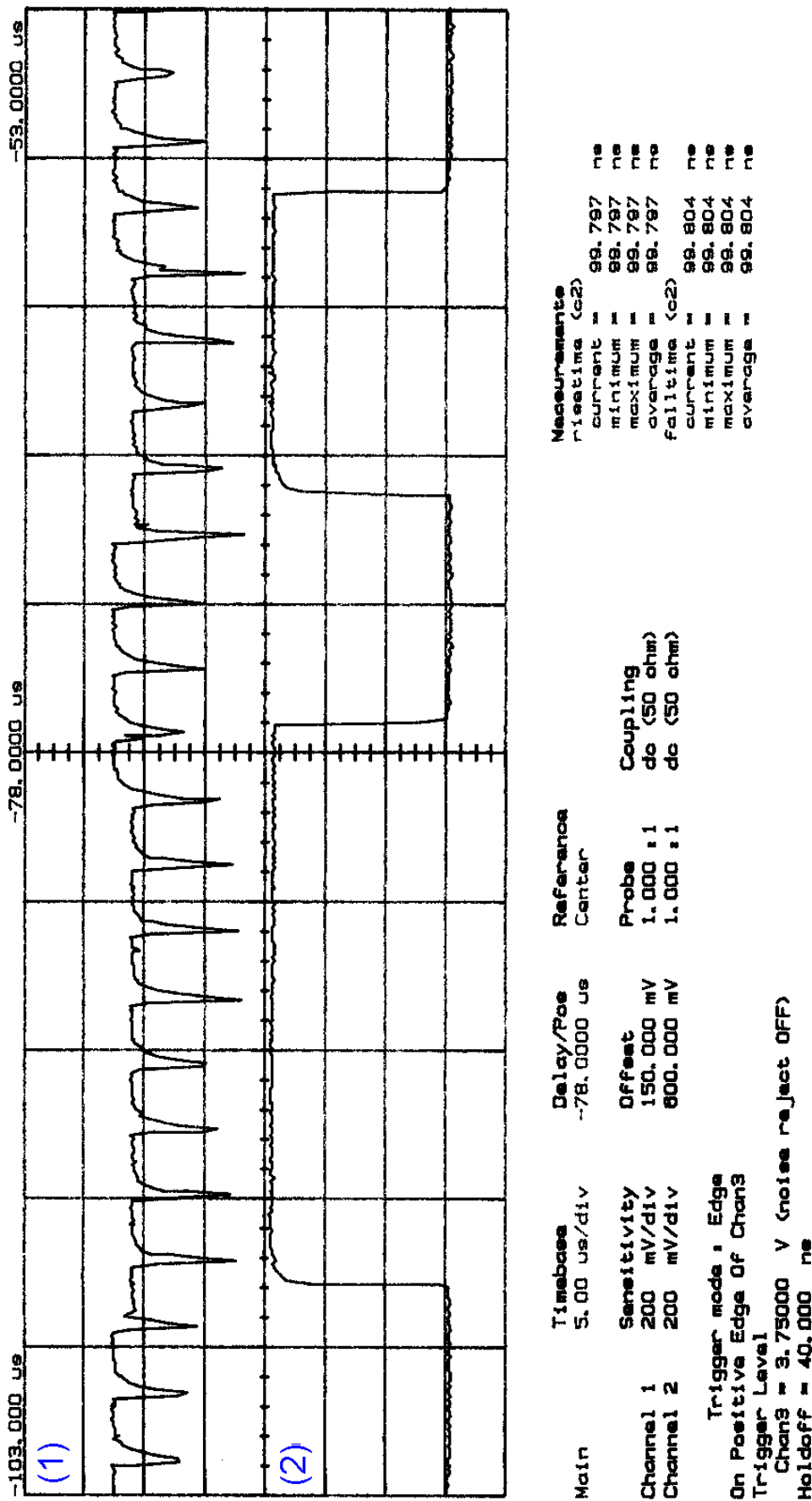


Abbildung 6.6: Gemessene Signalverläufe am Ausgang der Senderschaltung (Kurve (1)) und am Messpunkt 'dataaus (analog)' (Kurve (2)).

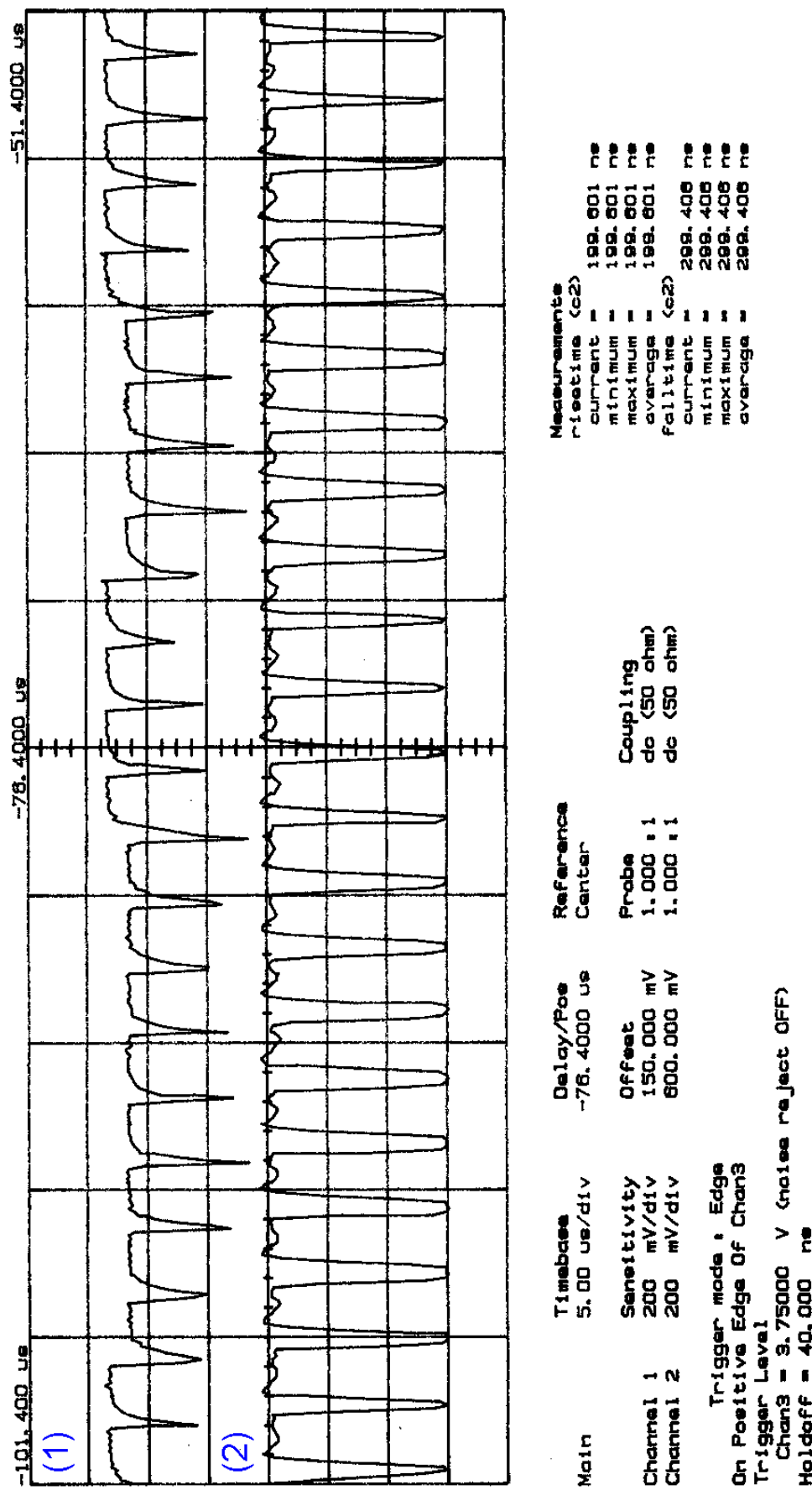


Abbildung 6.7: Gemessene Signalverläufe am Ausgang der Senderschaltung (Kurve (1)) und am Messpunkt 'taktaus (analog)' (Kurve (2)).

Damit lässt sich feststellen, dass die optische Signal- und Energieübertragung zu einem Empfänger, der für die Implantation in ein Auge konstruiert worden ist, erfolgreich demonstriert wurde. Zusätzlich zu den bisher gezeigten Ergebnissen ist in Abb. 6.8(a) das Ergebnis einer Signal- und Energieübertragung bei einer Datenübertragungsrate von 224 kbit/s dargestellt. Hier ist das Ausgangssignal des FPGA zu sehen (Kurve (1)), also die zu übertragenden Daten, die in die Senderschaltung eingespeist werden, dazu die rekonstruierten Daten, die gegenüber den vom FPGA gelieferten Daten invertiert sind, (Kurve (2)) und das Taktsignal am Ausgang 'taktaus (digital)' des Digitalteils der Empfangselektronik (Kurve (3)). Dieses Taktsignal wird aus dem von der Empfängerschaltung rekonstruierten Takt durch eine Frequenzteilung mit dem Teiler acht gewonnen. Mit diesem Taktsignal wird der digitale Schaltungsteil synchronisiert, sodass dieser die von der Empfängerschaltung rekonstruierten Daten verarbeiten kann. Die Funktion dieses Schaltungsteils, der am FhG-IMS, Duisburg, entwickelt wurde [68,113], ist in Abb. 6.8(b) zu erkennen. Bei diesem elektrischen Test wurden die Daten aus dem FPGA (Kurve (1)) und ein mit einem Funktionsgenerator erzeugtes Taktsignal (Kurve (2)) an die Eingänge der Digitalschaltung angelegt und die decodierten Daten gemessen (Kurve (3)).

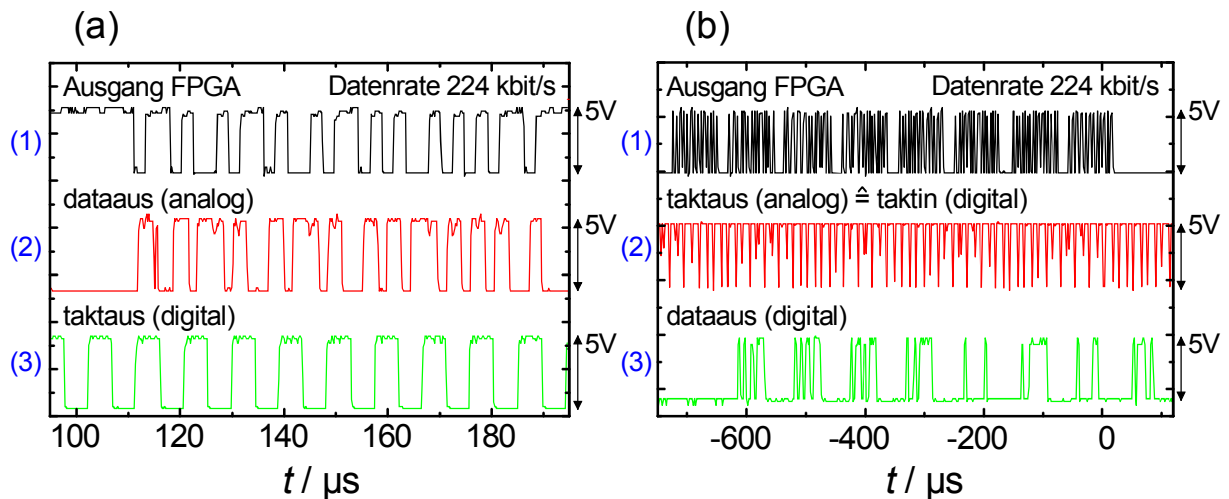


Abbildung 6.8: (a) Optische Signal- und Energieübertragung bei einer Übertragungsrate von 224 kbit/s. (b) Funktionsweise der Digitalschaltung der Empfangselektronik (elektrischer Test). Die Bedeutung der einzelnen Kurven sind im Text näher erläutert.