Fakultät für Physik und Astronomie

Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg

Diplomarbeit

im Studiengang Physik

ausgeführt von

Marcus Teodori

August 1997

E-Mail: teodori@asic.uni-heidelberg.de

Institut für Hochenergiephysik, ASIC-Labor

Schröderstraße 90, D-69120 Heidelberg

Inhalt

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Vision-Projekts ausgeführt. Sie besteht aus zwei prinzipiell verschiedenen Teilen. Im ersten Abschnitt werden in analoger CMOS-Technologie hergestellte Teststrukturen untersucht. Die Teststrukturen beinhalten regelbare Widerstände (Switched Capacitors) und einige adaptive Pixel, die das Verhalten biologischer Photorezeptoren nachahmen. Die Eigenschaften dieser Teststrukturen wurden untersucht und beschrieben. Im zweiten Teil wird die Messung der spektralen Quanteneffizienz von Photodioden des 0,8 µm CMOS-Prozess von AMS vorgestellt und diskutiert.

Abstract

This paper was carried out in the course of the vision-project. It consists of two principally different parts. In the first section, test structures produced in analog CMOS-technology are examined. The test structures contain variable resistors (switched capacitors) and some adaptive pixels which imitate the characteristics of biological photorezeptors. The nature of these test structures are examined and documented. In the second part the measurement of the spectral quantum efficiency of photo-diodes of the 0.8 µm CMOS-process by AMS is presented and discussed.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung und Messungen optoelektronischer Strukturen in CMOS[1] Technologie. Sie wurde im Rahmen des Vision-Projektes im Institut für Hochenergiephysik durchgeführt und baut auf vorangegangene Diplomarbeiten [1,2] auf.

Unter der Leitung von Prof. K. Meier wird im ASIC[2]-Labor des IHEP in Zusammenarbeit mit der Universitätsaugenklinik ein System entwickelt, das Sehbehinderten und Blinden ermöglichen soll, sich in Ihrer Umgebung leichter zurechtzufinden. Die Grundidee dabei ist die Umwandlung optischer Informationen in mechanische Reize, die über den Tastsinn wahrgenommen werden. Dieses Konzept des taktilen Sehens wurde schon Anfang der siebziger Jahre entwickelt, scheiterte damals aber an der technischen Realisation [4,5].

Das System besteht aus 2 Teilen: dem Vision-Part und dem Action-Part. Der Vision-Part setzt sich zusammen aus einem optischen Sensor zur Bildaufnahme und einer Bildverarbeitungseinheit. Die erfaßten Signale werden mit Hilfe eines Laptops aufbereitet und an den Action-Part, der Ausgabeeinheit übertragen. Diese Einheit besteht zur Zeit in Form eines Tastfeldes aus 8-Punkt Braille-Modulen, deren 8 Stifte einzeln ansteuerbar angehoben oder abgesenkt werden. Dieses System trägt die blinde Person mit sich und kann damit Strukturen aus der Umgebung ertasten. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich ausschließlich mit dem Vision-Part und beinhaltet zum einen Beiträge zur Verbesserung der Pixel[3] der vorhandenen Vision-Chips [1,2] und zum anderen empirische Messungen spektraler Quanteneffizienzen an p-n Übergängen.

Es wurde ein Chip entwickelt, der drei verschiedene Arten von Teststrukturen beinhaltet: regelbare Widerstände (Switched Capacitors), Testpixel und Photodioden. Außerdem wurden Eichmessungen am optischen Tisch des ASIC-Labors durchgeführt. Beim Design der Switched Capacitors war die Vorgabe, hohe Widerstandwerte mit

---

[1] CMOS: **C**omplementary **M**etal **O**xid **S**ilicon

[2] ASIC: **A**pplication **S**pecific **I**ntegrated **C**ircuit

[3] Pixel: **P**icture **E**lement

linearer Kennlinie, bei gleichzeitig minimaler Fläche zu erreichen. Das Layout und die Messungen zu diesen Minimum-Size-Widerständen wird ausführlich beschrieben. Die im zweiten Teil beschriebenen Testpixel sind modifizierte Standartpixel aus den schon vorhandenen und funktionierenden Vision-Chips [1,2]. Die Modifikationen beziehen sich größtenteils auf das adaptive Verhalten der Pixel. Der letzte Teil der Arbeit befaßt sich mit der Ermittlung der spektralen Quanteneffizienz von n^+-Substrat-Dioden im 0,8 µm CMOS-Prozeß. Auf dem Chip befinden sich u. a. 4 Photodioden mit unterschiedlichen Abschirmungen. Die Auswirkungen dieser Abschirmungen auf die spektrale Quantenausbeute wurde untersucht und analysiert.

Bild Einleitung.1 zeigt eine CCD-Kamera-Aufnahme unter einem Mikroskop des gebondeten[4] Chips in einem 84-Pin-Gehäuse.

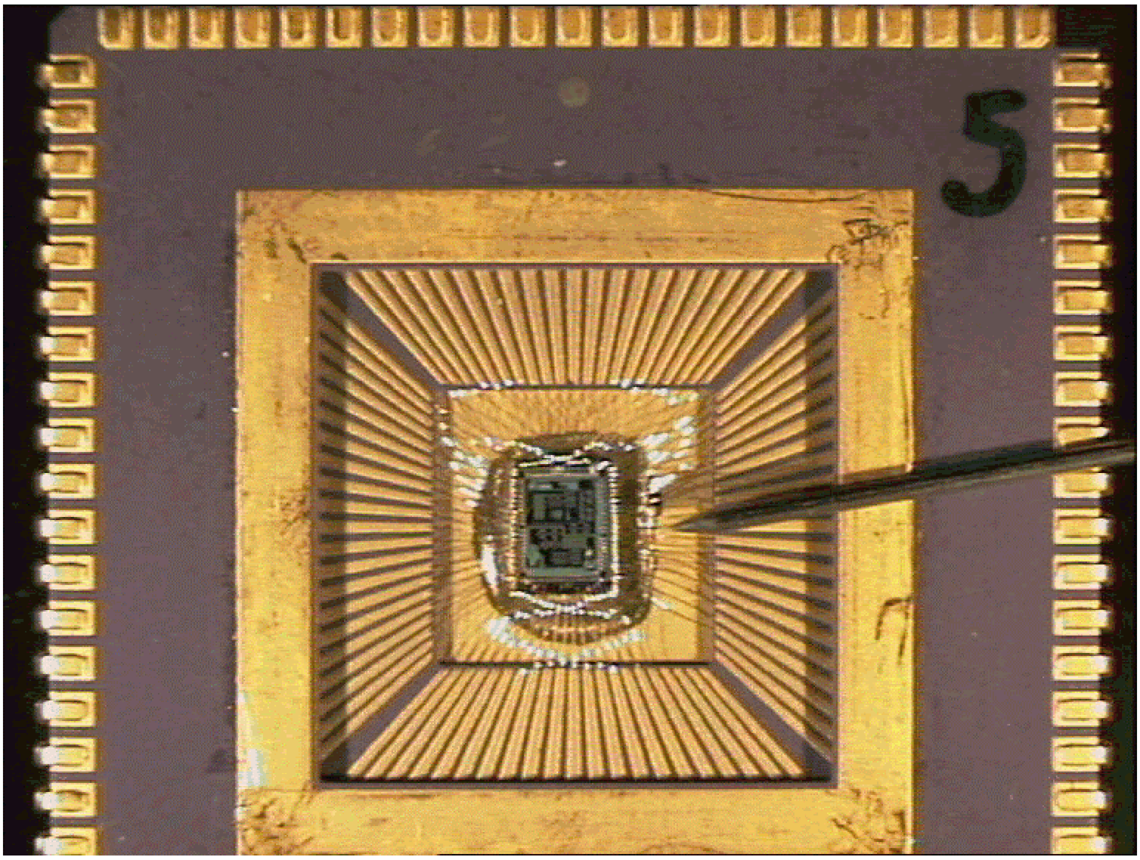

Bild Einleitung.1: Aufnahme des gebondeten Chips im Gehäuse im Vergleich zu einer Stecknadel

Man erkennt in der Mitte den Chip, der auf das Gehäuse geklebt wurde. Die Anschlüsse auf dem Gehäuse sind mit Bond-Drähten mit den Pads des Chips verbunden.

[4] bonden: kontaktieren der Anschlußpads des Chips mit den Pads des Gehäuses. Die 25 µm dicken Drähte werden im Thermokompressionsverfahren unter einem Mikroskop mit einem speziellen Schweißwerkzeug angebracht.

1 Der CMOS-Prozeß

Die MOS(Metall-Oxid-Semiconductor)-Technologie ist neben der bipolaren die verbreitetste Technologie zur Herstellung integrierter Schaltungen. Ihr Grundbaustein ist der MOS-Feldeffekttransistor. Die Leitfähigkeit von Feldeffekttransistoren (FET) wird von einem elektrischen Feld gesteuert, das bei Anlegen einer Spannung an eine Kapazität entsteht. Besteht das Dielektrikum dieser Kapazität aus der Verarmungszone eines in Sperrichtung gepolten pn-Übergangs, so handelt es sich um eine Sperrschicht-FET (Junction FET, JFET), wird sie aus einer Oxidschicht gebildet, so handelt es sich um einen MOSFET.

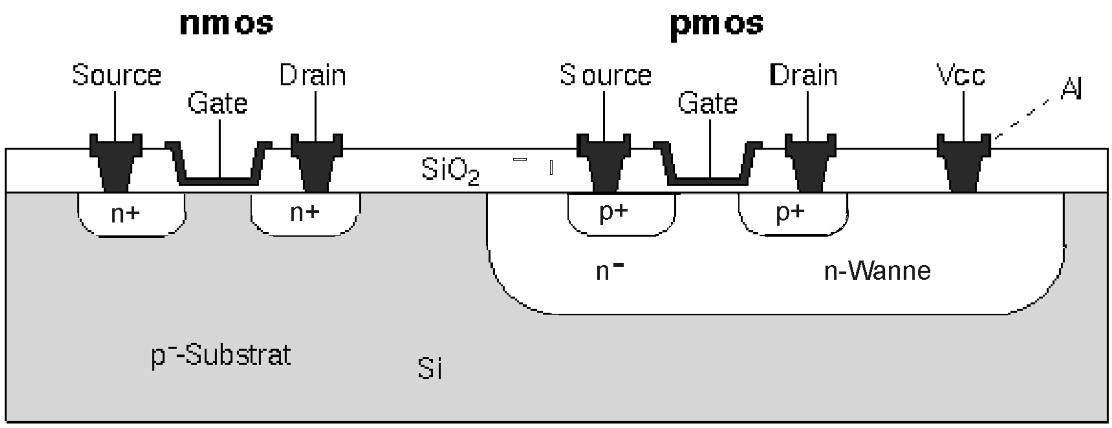

Bild 1.1: Querschnitt durch eine CMOS-Sruktur aus n-kanal und p-kanal MOSFET

Wir unterscheiden n- und p-Kanal MOSFETs. Ein n-Kanal-MOSFET besteht aus einer Metall-Oxid-Silizium-Schichtstruktur und zwei angrenzenden Diffusionsgebieten hoher n-Dotierung, der sogenannten *Source* und dem *Drain* (siehe Bild 1.1). Anstelle der Metallage wird heute meist eine Polysiliziumschicht verwendet, die als *Gate* bezeichnet wird. Das Halbleitersubstrat besteht aus schwach p-dotiertem Silizium, das ebenfalls einen Anschluß besitzt (Bulk). Ein p-Kanal-MOSFET unterscheidet sich von dem obigen n-Kanal-Typ dadurch, daß Drain und Source hier p-dotiert sind und das Substrat aus n-dotiertem Silizium besteht.

Gegenstand meiner Untersuchung ist der CMOS-Prozess (C=Complementary). Dies ist ein Prozeß, der sowohl n- als auch p-Kanal-FETs auf dem gleichen Substrat erlaubt. Das wird durch sogenannte Wannen (wells) ermöglicht. Wird z.B. p-dotiertes Silizium als Substrat verwendet, dann muß der p-MOSFET in eine n-dotierte Wanne gebettet werden (siehe Bild 1.1). Charakteristische Parameter eines MOS-Transistors sind die Weite W und die Länge L des Kanals, ebenso wie die Dicke t_{ox} der Oxidschicht, welche das Gate und den Kanal trennen. Die minimalen Werte von W und L sind durch das Auflösungsvermögen des Lithographieprozesses beschränkt und haben bei heutigen CMOS Prozessen Werte von 0.35μm bis 2μm, und die Werte der Oxiddicke t_{ox} bewegen sich zwischen 100 Å und 300 Å. Die Tiefe der Diffusionsgebiete von Drain und Source variiert von 0.3μm bis 0.6μm. Zum besseren Verständnis des Verhaltens eines MOSFET ist die Energiebandtheorie und ihre Anwendung auf den MOS-Transistor von Nutzen.

2 Teststrukturen

2.1 Chip und Testplatine

Zur Entwicklung des Testchips wurde das Softwarepaket *Cadence* benutzt, das alle Funktionen vom schematischen Schaltplan bis hin zum fertigen Layout zur Verfügung stellt. Das Design wurde für den 0,8 µm CMOS-Prozeß von *AMS* (Austria Micro Systems) ausgelegt, der über zwei Metall- und zwei Polylagen verfügt. Die Größe von 0,8 µm bezeichnet die kürzeste mögliche Gatelänge die in diesem Prozeß erlaubt ist. Auch andere geometrische Parameter wie Länge und Breite der Aluminium-, Polysilizium- und Diffusionsschichten und vor allem die Abstände zwischen diesen verschiedenen Schichten sind durch die sog. *Design Rules* [20] der Firma AMS fest vorgegeben.

Auf dem Chip befinden sich mehrere Teststrukturen mit verschiedenen Funktionen.

Die Schaltung des S*witched Capacitors*[5] in CMOS-Technik wurde näher untersucht und wird in Kapitel 2.2 beschrieben. Aufbauend auf dieser Schaltung wurde der Switched Capacitor (kurz: SC) in das modifizierte Standardpixel aus [1] eingesetzt. Das Layout dieses Pixels wurde zuvor vom 1,2 µm CMOS-Prozeß in den 0,8 µm CMOS-Prozeß umgewandelt. Im ursprünglichen Pixel ist die Adaptationszeit[6] schaltungsmäßig fest vorgegeben. Das Ziel des Testpixels war, diese Adaptationszeit von außen zu regeln. In Abschnitt 2.3 wird untersucht, wie sich der zuvor beschriebene SC in der Funktion des adaptiven Elements eines Standardpixels verhält.

Die genaue Funktionsweise des Standardpixels, die Schaltung und die biologische Motivation des adaptiven Photorezeptors kann in [1] nachgelesen werden.

Der letzte Teil der Arbeit beschreibt die Untersuchung der spektralen Quanteneffizienz von n^+-Substrat-Dioden im 0,8 µm CMOS-Prozeß.

[5] Switched Capacitor: über eine anliegende Taktfrequenz regelbarer Widerstand.

[6] Adaptationszeit: Zeit, die das System benötigt, um sich auf den herrschenden Helligkeitspegel anzupassen.

Bild 2.1 zeigt eine 35-fach vergrößerte Aufnahme des Chips, die mit Hilfe einer CCD-Kamera unter einem Mikroskop aufgenommen wurde.

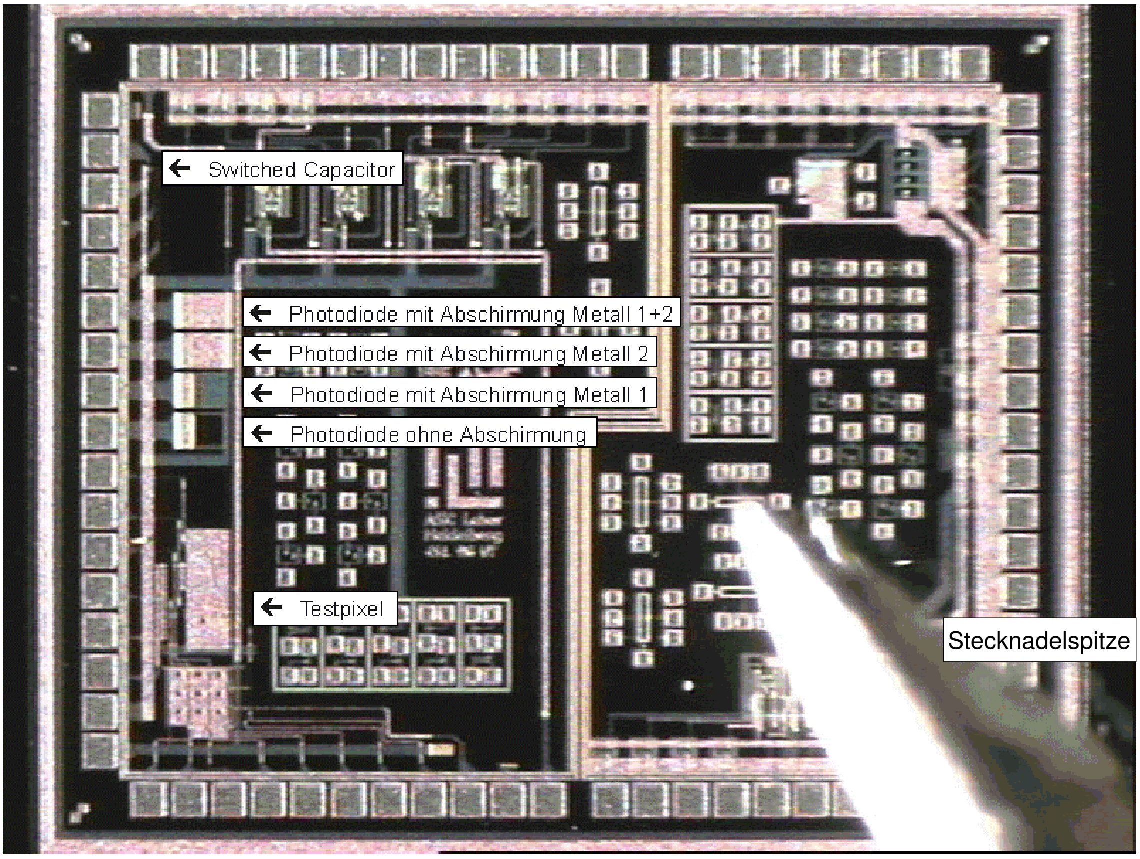

Bild 2.1: Mikroskopbild des Testchips

Aus Kostengründen wurden auf dem Chip noch Teststrukturen von anderen Arbeitsgruppen des ASIC-Labors untergebracht. Die Teststrukturen, die in dieser Arbeit besprochen werden, befinden sich auf der linken Seite des Chips.

Die für die Schaltungen auf dem Chip benötigten Spannungen müssen extern erzeugt und zugeführt werden. Außerdem lassen sich viele Teststrukturen nur über einen Verstärker messen, da sie nicht in der Lage sind, die für einige Meßgeräte nötigen Spannungen zu liefern. Aus diesem Grund wurde eine Testplatine aufgebaut, auf der die äußere Beschaltung des Chips untergebracht ist. Bild 2.2 zeigt ein Photo dieser Testplatine auf der in der Mitte der im Sockel sitzende Chip zu erkennen ist. Um den Chip herum befinden sich einige ICs[7] und passive Bauelemente die der Spannungsversorgung und -Regelung dienen. Die Schaltung zur Spannungsversorgung des Chips und die Verstärkerschaltung zur Auslese der Pixel können auf Seite 52 bis Seite 56 in [1] nachgelesen werden. An den Seiten der Platine sieht man die Buchsen für die Ein- und Ausgänge und Schalter zur Selektierung der Teststrukturen.

[7] IC: **I**ntegrated **C**ircuit

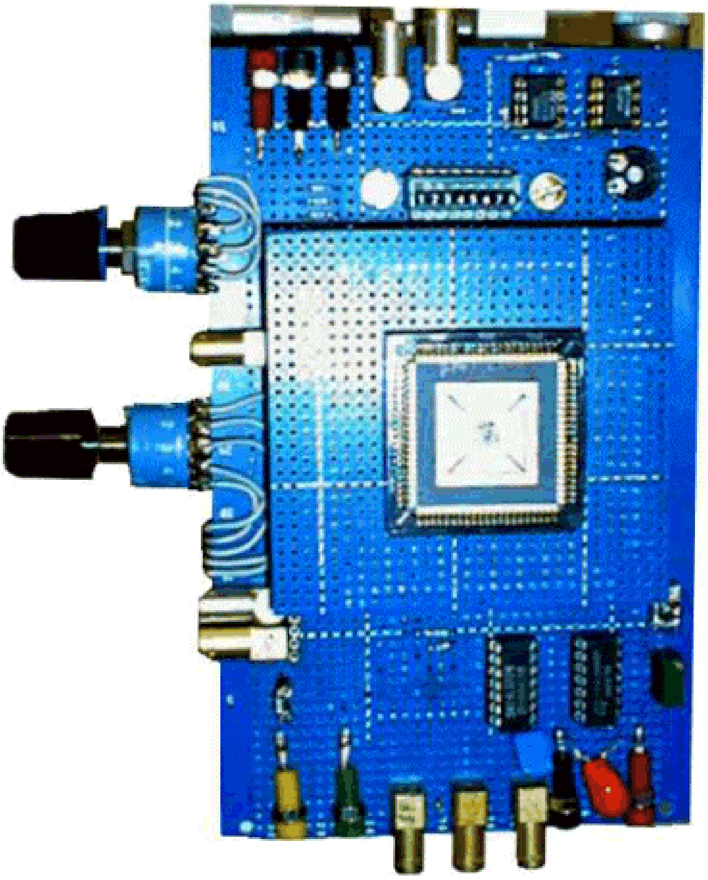

Bild 2.2: Testplatine mit Chip und der Versorgungs- bzw. Verstärkerelektronik.

Diese Testplatine ist ein Teil des in 3.2 beschriebenen Versuchsaufbaus.

2.2 Switched Capacitor

Auf dem in [1] beschriebenen Vision-Chip, ist die Adaptationszeit der Pixel von einigen Sekunden durch ein RC-Glied fest vorgegeben. Erwünscht war es, ein adaptives Element zu entwickeln, welches eine stufenlose Einstellung der Adaptationszeit ermöglicht.
Wenn man nun die Adaptationszeit von außen beeinflussen möchte kann man die Zeitkonstante durch geschicktes Verändern von Widerstand und/oder Kapazität steuern. Die Adaptationszeit τ ist gegeben durch τ=RC. Wenn man die Zeitkonstante verändern möchte, muß man entweder R oder C variieren. In diesem Fall ist es aus mehreren Gründen einfacher, den Widerstand veränderbar zu layouten. Die Kapazität mit sogenannten VariCaps zu regeln bringt große Nachteile mit sich. Zum Einen nimmt eine VariCap sehr viel Platz in Anspruch und zum Anderen sind Nichtlinearitäten praktisch unvermeidbar (zum heutigen Stand der Technik), was sich natürlich fatal auf die kontrollierte Regelung der Adaptationszeit auswirken würde.

Die Vorteile des Switched Capacitor liegen klar auf der Hand: Sehr große Widerstandswerte bei geringem Platzaufwand. Wenn die Schaltung in 0,8μ-CMOS Technik mit Minimum-Size Transistoren ausgeführt wird, beträgt der Platzaufwand

7,8 µm x 5,3 µm bei Widerstandswerten von $10^{10}\ \Omega$ ...$10^{12}\ \Omega$. Damit erreicht man eine Adaptationszeit von 0,1 sec. ...10 sec.

Für den einfachsten Fall einer SC-Schaltung benötigt man nur eine Kapazität und 2 Schalter, die durch Minimum-Size Transistoren realisiert werden. Außerdem mußt man eine nicht überlappende, alternierende Rechteckspannung (Non-Overlapping-Clock) anlegen, mit deren Hilfe man den Widerstandswert stufenlos regeln kann. Folgende Schaltung (Bild 2.3), die einen realen Widerstand enthält, soll nun durch eine SC-Schaltung ersetzt werden.

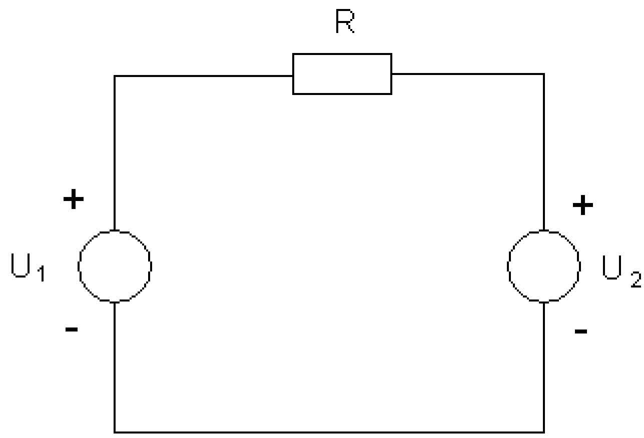

Bild 2.3: Ohmscher Widerstand, der durch einen Switched Capacitor ersetzt werden soll

Die entsprechende SC-Schaltung sieht folgendermaßen aus (Entnommen aus [19]):

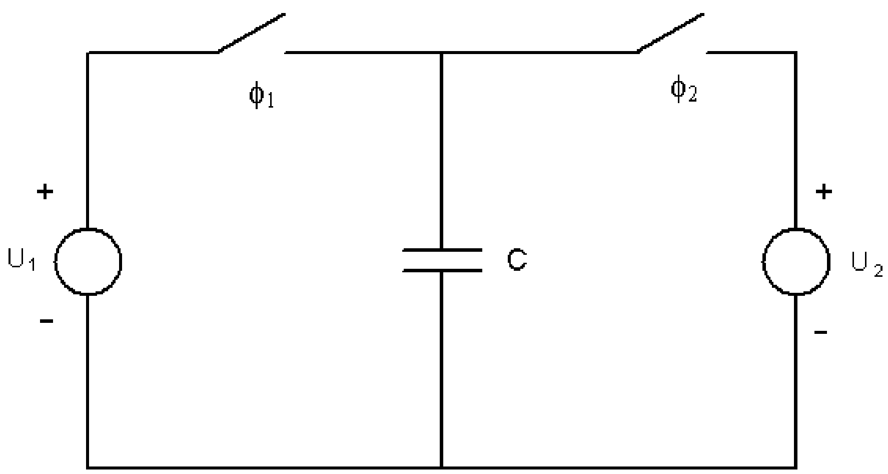

Bild 2.4: Schaltung des Switched Capacitors.

An den beiden Schaltern ϕ_1 und ϕ_2 liegt eine alternierende Rechteckspannung an, die nicht überlappen darf (Entnommen aus [19]):

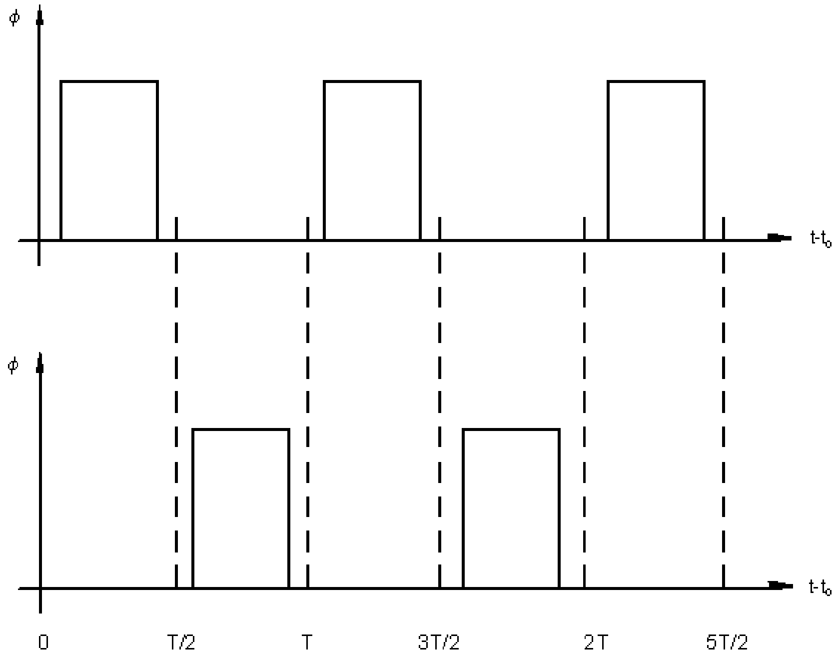

Bild 2.5: Form der Clock des SC

Die Kapazität wird während jeder Taktperiodendauer abwechselnd einmal auf den Eingang und einmal auf den Ausgang geschaltet. Dabei entstehen auf dem Kondensator jeweils Ladungsänderungen, die einen mittleren Strom vom Eingang zum Ausgang zur Folge haben.

In der Periode von t_0 bis $t_0 + T$ gilt für die Ladung in Richtung I_1.

$$q_1(t_0+T) = \int_{t_0}^{t_{0+T}} I_1(t)dt)$$

(2.1)

Man kann diese Gleichung in 2 Teile aufspalten.
Der erste Teil beschreibt den Ladungsfluß von t_0 bis $T/2$:

$$q_1(t_0 + \frac{T}{2}) = C\left[V_1(t_{0+} \frac{T}{2}) - V_2(t_0)\right] \cong C(V_1 - V_2)$$

(2.2)

Der zweite Teil beschreibt den Ladungsfluß von T/2 bis T:

$$q_1\left(t_0 + T\right) - q_1\left(t_0 + \frac{T}{2}\right) = 0$$

(2.3)

Gleichung (2.3) kann ersetzt werden durch:

$$q_1(t_0 + T) = C(V_1 - V_2) = \int_{t_0}^{t_0+T} I_1(t)dt$$

(2.4)

dividiert man beide Seiten von Gleichung (2.2) durch T, erhält man:

$$\frac{C(V_1 - V_2)}{T} = \frac{1}{T}\int_{t_0}^{t_0+T} I_1(t) = I_1(mittel)$$

(2.5).

Aus Bild 2.3 folgt:

$$I(mittel) = I_1 = \frac{V_1 - V_2}{R}$$

(2.6).

Einsetzen von (2.5) in (2.6) führt auf:

$$R = \frac{T}{C} = \frac{1}{Cf_{clock}}$$

(2.7).

f_{clock} = 1/T ist die Frequenz der Clock-Signale ϕ_1 und ϕ_2 .

Um einen möglichst großen Wert für den Widerstand zu erhalten, müssen Kapazität und Taktfrequenz möglichst klein gehalten werden.

Bei der Verkleinerung der Kapazität auf den denkbar kleinsten Wert wendet man einen Trick an, der anhand des Layoutes näher erläutert wird.

2.2.1 Schaltplan und Layout des Switched Capacitors

Da die Schaltung, die für die Adaptationszeit verantwortlich ist, im ursprünglichen Pixel sehr kompakt ist, war die Vorgabe, eine möglichst kleine SC-Schaltung zu layouten. Im Prinzip besteht die Schaltung aus 3 Bauteilen: zwei Schalter und eine Kapazität.

Bild 2.6 zeigt den Schaltplan der zur Simulation der Schaltung in *CADENCE*[8] gemacht wurde.

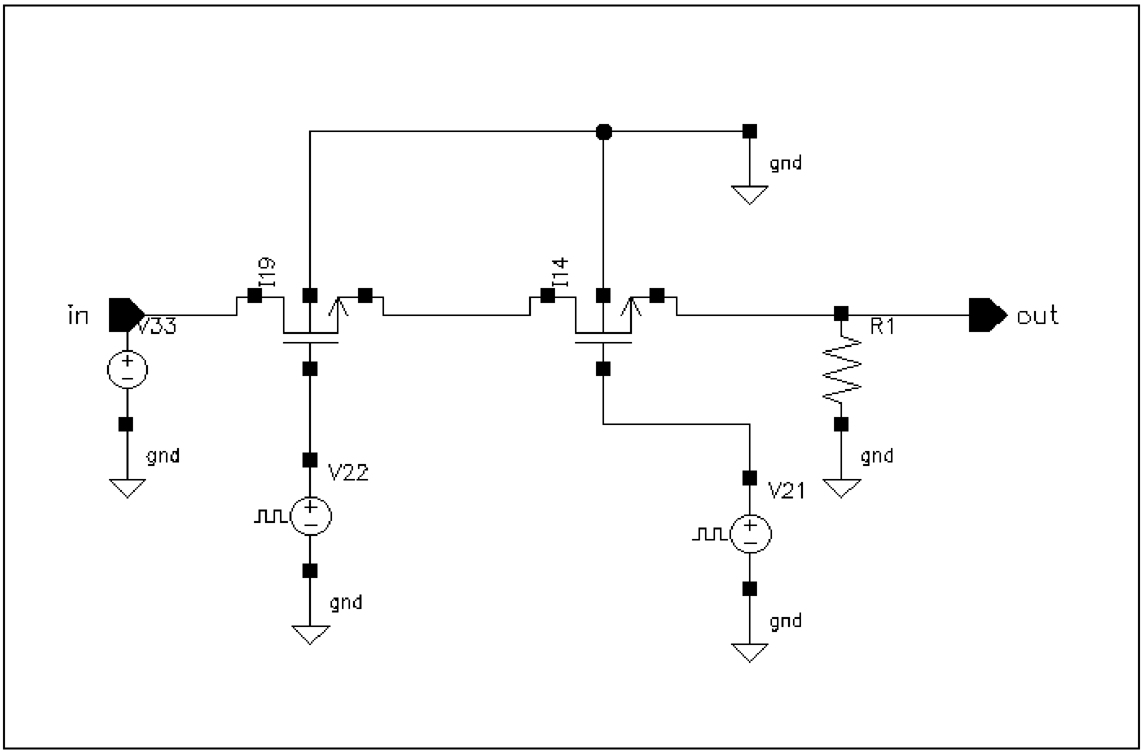

Bild 2.6: Schaltplan des Switched Capacitors

Die Schalter werden mit Minimum-Size NMOS Transistoren realisiert und als Kapazität dient das parasitäre[9] C der Leitung, die diese beiden Transistoren verbindet.

Bild 2.7 zeigt das Layout des Switched Capacitors.

Auf der rechten Seite befinden sich die beiden Eingänge der Clock, oben und unten erkennt man die beiden Anschlüsse des “Widerstandes“. Man sieht deutlich, daß beide Gate-Anschlüsse (rot) auf der gleichen Diffusion (grün) liegen. Die Kapazität bildet sich zwischen den Gate-Anschlüssen aus. Die violetten Bereiche stellen die Leitungen dar.

---

[8] CADENCE: Programm, mit dem Schaltplan und Layout gemacht wurden. Nähere Angaben unter [7, 8]

[9] parasitäres C: normalerweise nicht erwünschte Leitungskapazität

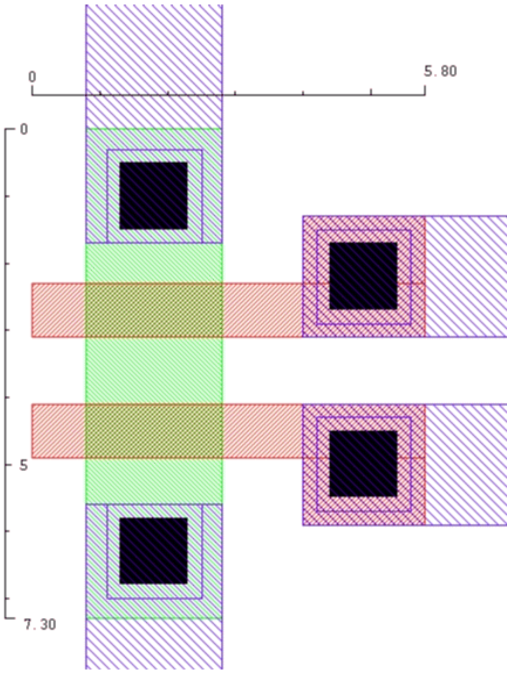

Bild 2.7: Layout des Switched Capacitor. Bemaßung in µm.

2.2.1.1 Schaltplan und Layout der Non-Overlapping-Clock

Bild 2.8 zeigt das Schaltbild der Non-Overlapping-Clock, mit der die in *Bild 3.3.* gezeigte Eingangsspannung des SC erzeugt wird.

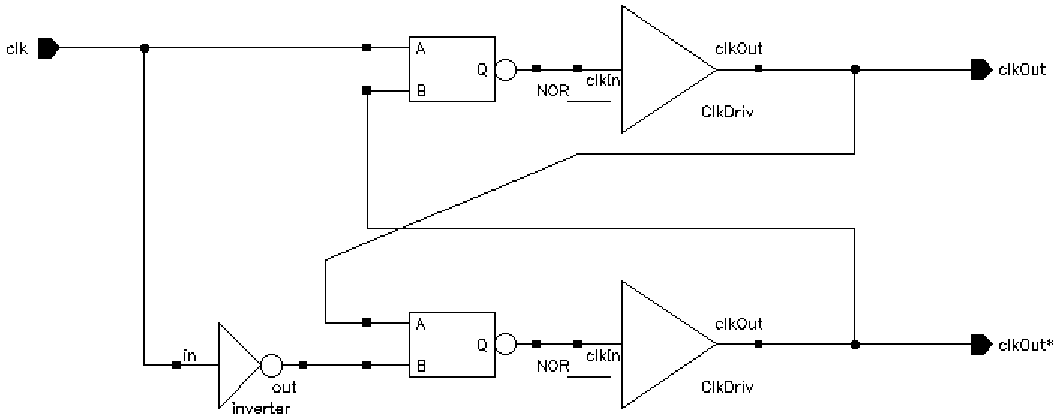

Bild 2.8: Schaltplan der Non-Overlapping-Clock.

Die logische Schaltung besteht aus einem *Inverter* und zwei *NOR-Gliedern*[10].

[10] NOR-Glied: Schaltung der Digitaltechnik, mit der eine Reihenschaltung von einem logischen ODER-Glied und einem logischen NICHT-Glied möglich ist.

Der Eingangstakt liegt einmal „normal“ und einmal invertiert auf je einen Eingang der beiden NOR-Gatter an. Vom Ausgang geht das über einen Treiber verstärkte Signal wieder kreuzweise auf den Eingang der NOR-Glieder zurück. Das Ergebnis ist eine Clock, wie sie in Bild 2.5 zu sehen ist. Weitere Ausführungen können in [19] S. 315 ff nachgelesen werden. Bild 2.9 zeigt das Layout der Non-Overlapping-Clock für den 0,8 µm C-MOS Prozeß.

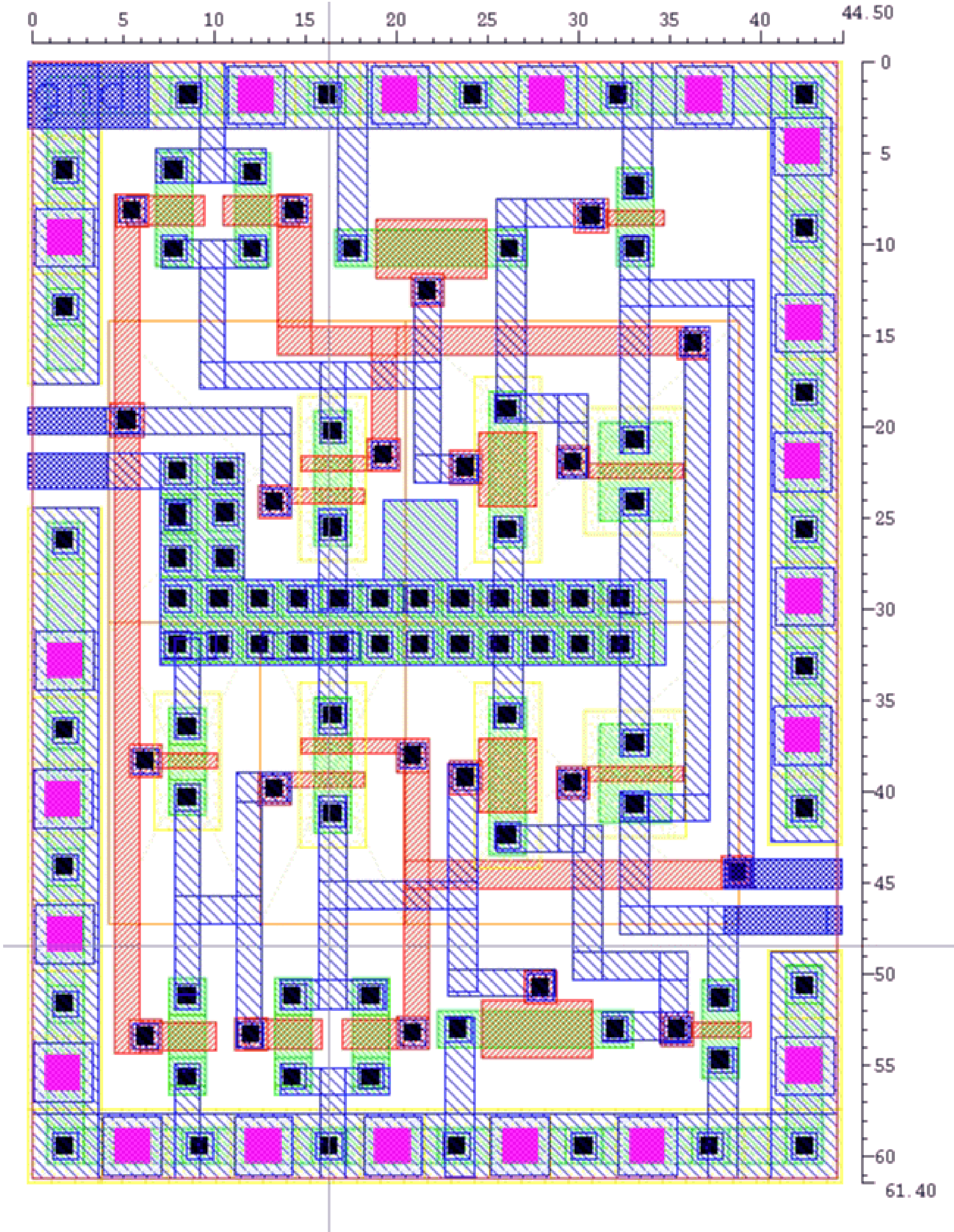

Bild 2.9: Layout der Non-Overlapping-Clock. Bemaßung in µm.

2.2.2 Messung und Meßergebnisse:

Der Switched Capacitor ist zum einen als einzelnes Bauteil auf dem Chip zu finden und zum anderen mit der Non-Overlapping-Clock in verschiedene Testpixel integriert. Diese Messung bezieht sich nur auf den einzelnen SC, der vier Anschlüsse besitzt (Eingang, Ausgang, 2 x Clock). Die Clock wurde mit Hilfe eines Funktionsgenerators von außen angelegt.

Die Kurve zeigt die lineare Abhängigkeit des Widerstandwertes gegenüber angelegten Takt.

Aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Messung, werden im nächsten Abschnitt die Schaltungen der Testpixel mit dem SC als adaptives Element besprochen.

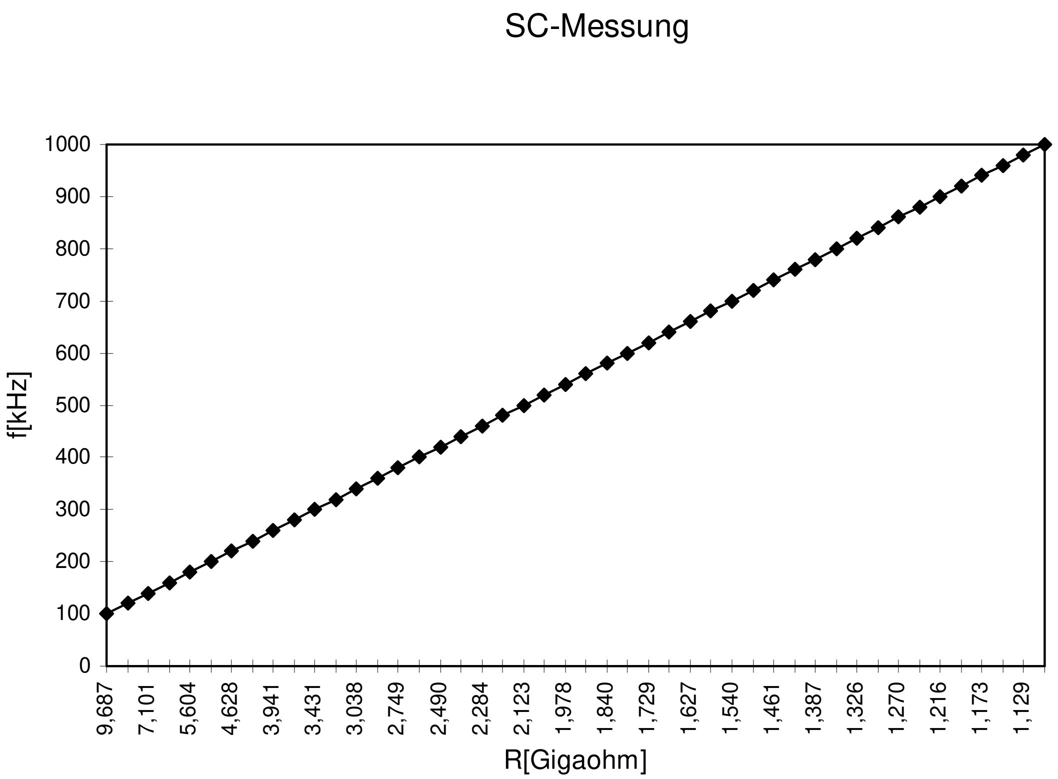

Bild 2.10: Messung Switched Capacitor

2.3 Testpixel mit SC

Ausgangspunkt für die Entwicklung des adaptiven Pixels war das biologische Vorbild des menschlichen Auges. Zwei wesentliche Bedingungen wurden an das künstliche Auge gestellt. Zum Einen sollte es einen großer dynamischer Bereich über 7-8 Dekaden (Mondlicht bis Sonnenlicht) haben und zum anderen ein deutliches Ansprechverhalten auf geringe Kontraste, unabhängig von der Umgebungshelligkeit.

Das exakte Adaptationsverhalten des Standardpixels kann in [1] nachgelesen werden.

Der Switched-Capacitors hat keinen Einfluß auf dynamische Eigenschaften des Photorezeptors, jedoch läßt sich damit die Antwort des modifizierten adaptiven Pixels auf eine Änderung der Beleuchtungsintensität regeln. Folgende Abbildung zeigt die Adaptation eines Schildkröten-Zapfens[11] nach einem Intensitätssprung (entnommen aus [16]).

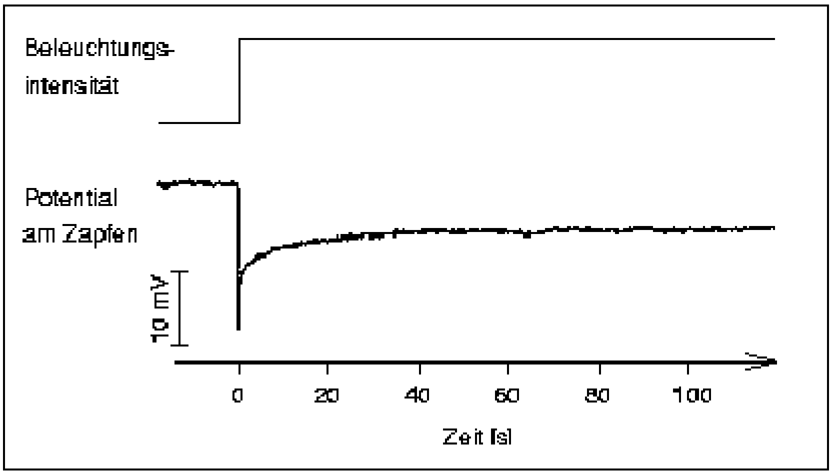

Bild 2.11: Adaptation eines Schildkröten-Zapfens nach einem Intensitätssprung

Wird die Lichtintensität sprunghaft verändert und dann über einen längeren Zeitraum konstant gehalten, so reagiert der Photorezeptor zunächst mit einem überhöhtem Ausgangssignal und adaptiert dann auf das neue Niveau. Das Adaptationsverhalten des Pixels wird dabei durch das adaptive Element bestimmt. Im Standardpixel aus [1] ist diese Zeit durch eine Schaltung fest vorgegeben. Die genaue Funktionsweise des adaptiven Elementes kann auf den Seiten 19 bis 31 in [1] nachgelesen werden.

[11] Zapfen: Flaschenförmige Fortsätze der Netzhautganglienzellen, die das Farbsehen vermitteln. (Entnommen aus [22])

Bild 2.12 zeigt das Adaptionsverhalten des Standardpixels.

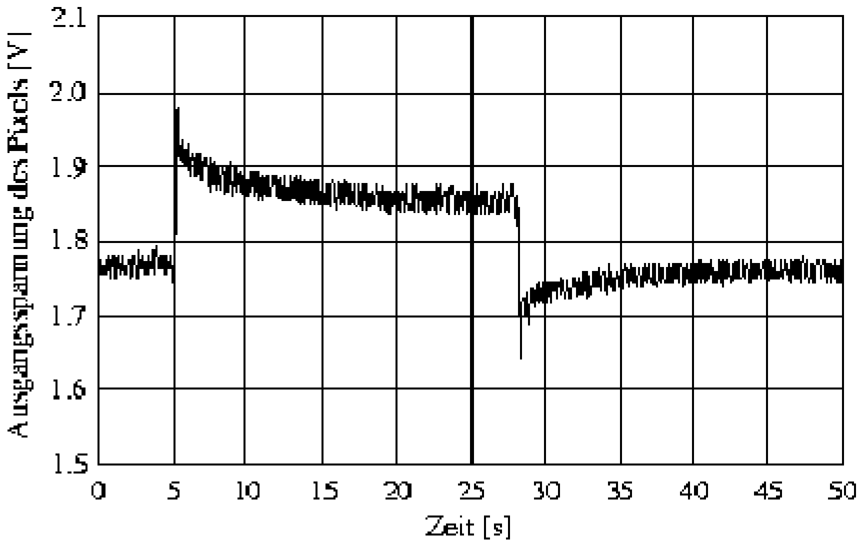

Bild 2.12 Adaptationsverhalten bei einem Pixel der 20 x 20 Matrix. Die Messung zeigt die Reaktion auf einen Intensitätssprung um einen Faktor 10, zunächst nach oben und dann wieder nach unten (Entnommen aus [1]).

Bei dem auf den 0,8 µm CMOS-Prozeß modifizierten Pixel des Testchips, befindet sich anstelle des adaptiven Elementes ein SC.Bild 2.13 zeigt das Layout des modifizierten Standardpixels.

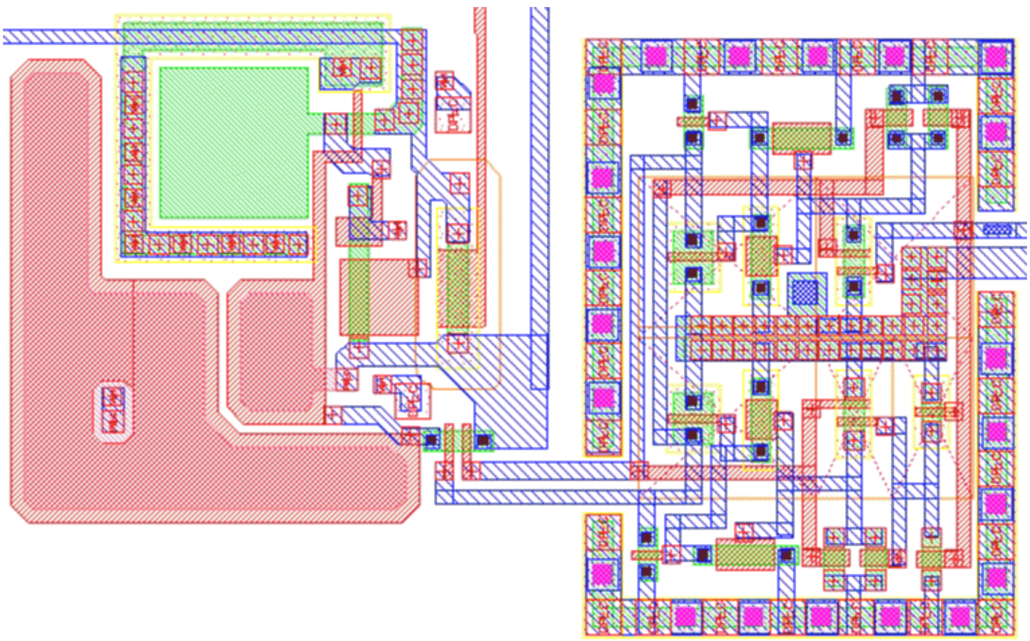

Bild 2.13: Layout des Standardpixels mit Switched Capacitor und Non-Overlapping-Clock

Man erkennt, daß die beiden Ausgänge der Non-Overlapping-Clock mit den beiden Takt-Eingängen des SCs verbunden sind. Wenn man in dieser Technik eine Pixelmatrix aufbauen würde, müßte man die Ausgangsleistung der Non-Overlapping-Clock so dimensionieren, daß nur eine Clock für die gesamte Matrix notwendig wäre und daß an jedem Pixel die Taktfrequenz unverfälscht ankommt.

2.3.1 Messung der Adaptationskurve des Rezeptors

An das in Bild 2.13 gezeigten Testpixel wurden nun nacheinander verschiedene

Taktfrequenzen zur Steuerung der Adaptationszeit angelegt. Die Messungen zeigen die Reaktion auf einen Intensitätssprung um den Faktor 10. Der Meßaufbau zu diesem Versuch wird in Abschnitt 2.3.2 näher erläutert. Die Kurven stammen direkt aus Messungen mit einem Speicheroszilloskop.

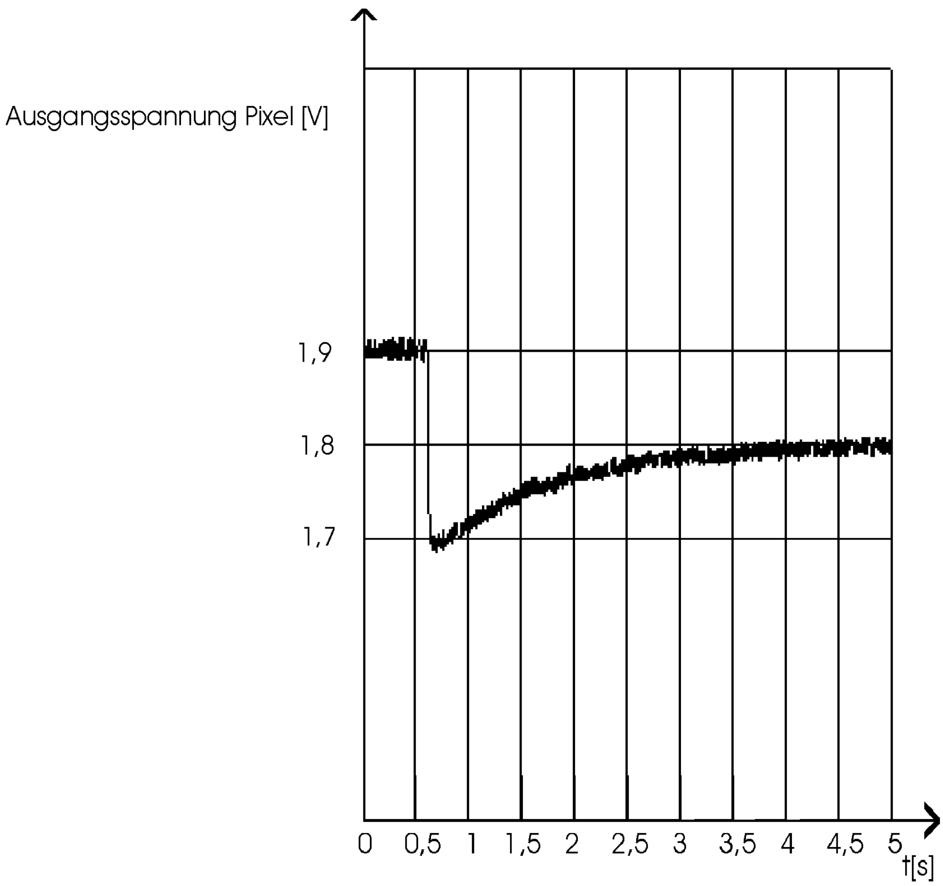

Bild .2.14: Adaptationsverhalten des Testpixels bei 200 Hz Clockfrequenz des SC

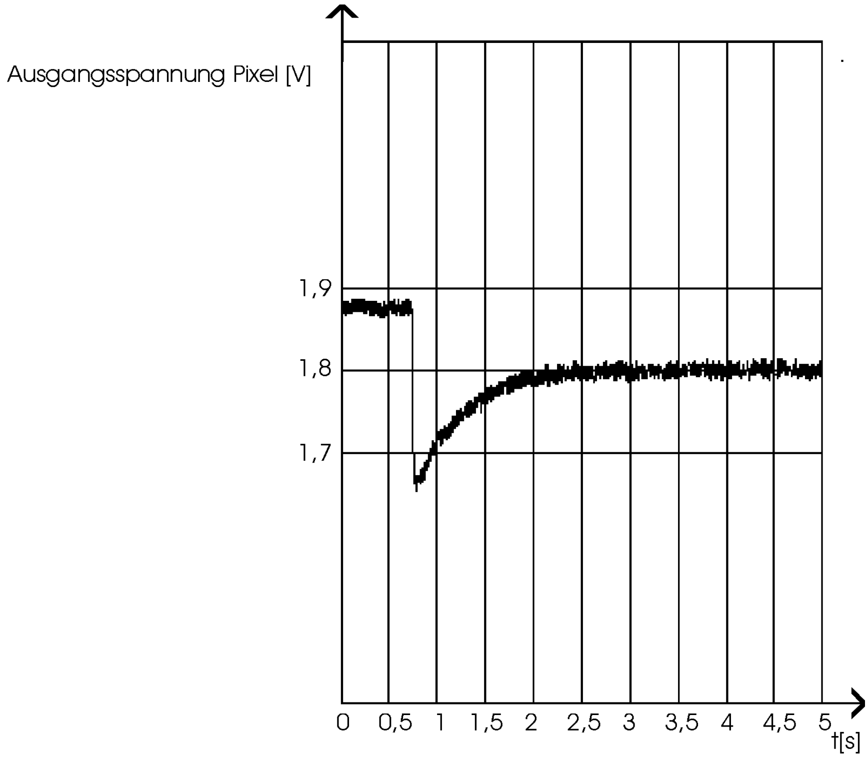

Bild 2.15: Adaptationsverhalten des Testpixels bei 500 Hz Clockfrequenz des SC

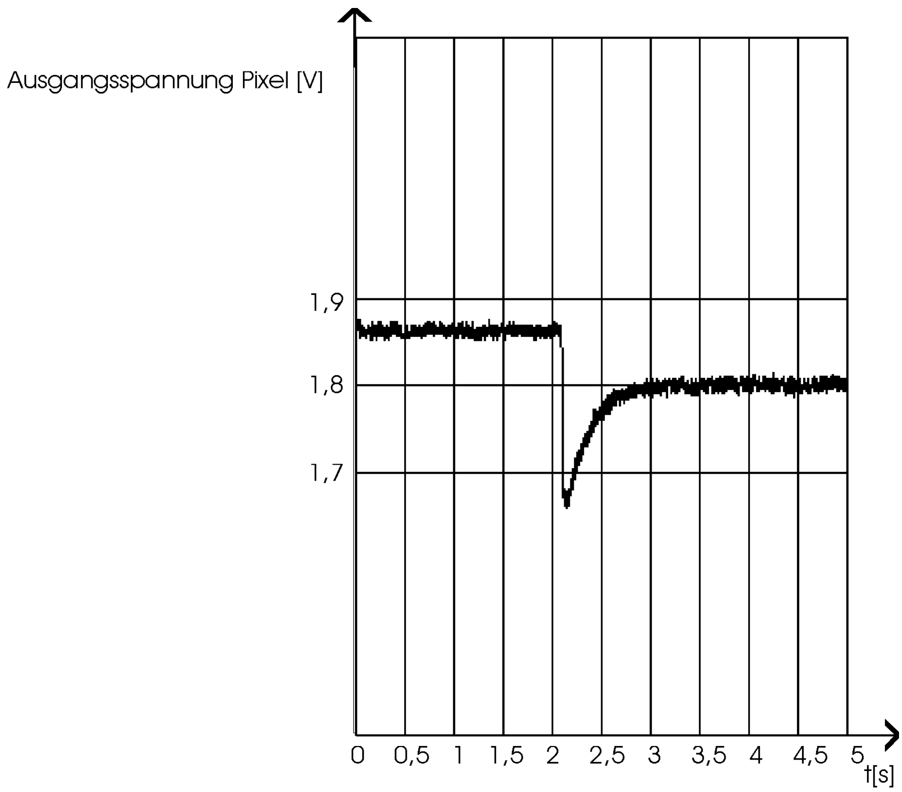

Bild 2.16: Adaptationsverhalten des Testpixels bei 1 kHz Clockfrequenz des SC

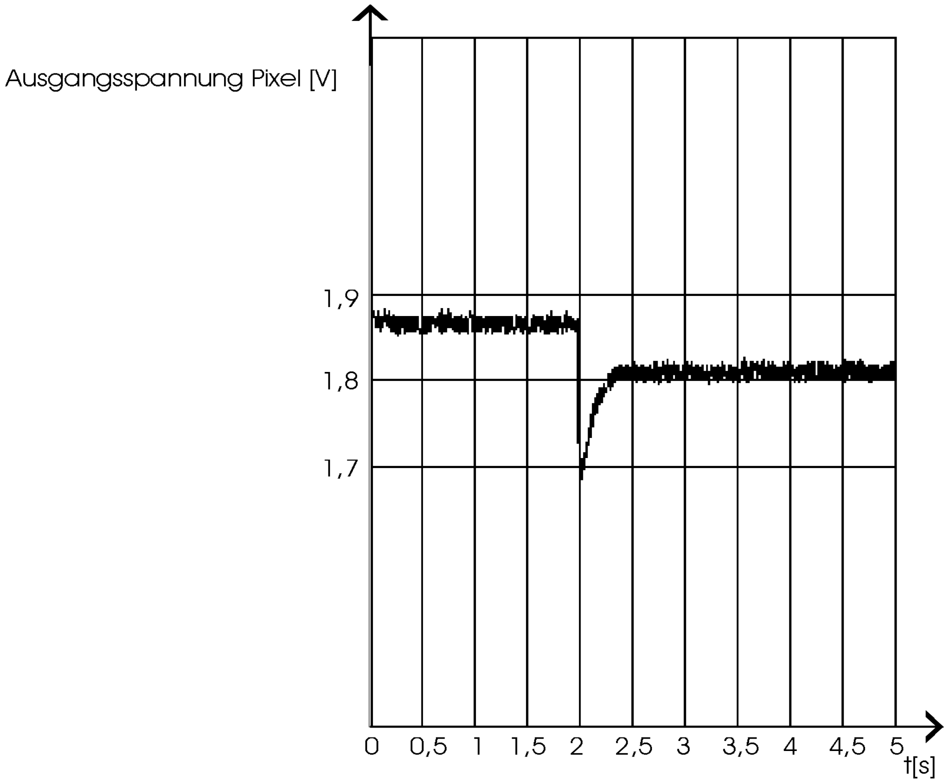

Bild 2.17. Adaptationsverhalten des Testpixels bei 2 kHz Clockfrequenz des SC

Man sieht deutlich, daß sich mit steigender Frequenz die Adaptationszeit verkürzt. Außerdem kann man keinen negativen Einfluß auf die Verstärkung des Schaltkreises feststellen. In Bild 2.18 wurde dieser Sachverhalt für mehrere Frequenzen dargestellt. Man erkennt, daß zwischen der am SC anliegenden Clock-Frequenz und der Adaptationszeit ein linearer Zusammenhang besteht, der nach der Einzelmessung des SCs (Bild 2.10) zu erwarten war.

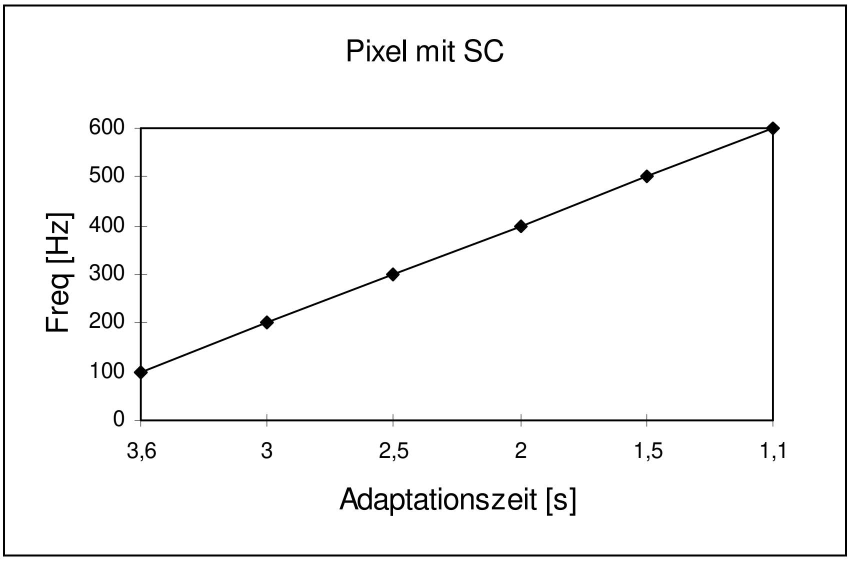

Bild 2.18: Diagramm Adaptationszeit vs. Clock-Frequenz

Mit welchem Versuchsaufbau die Messungen des Adaptationsverhaltens des Pixels gemacht wurden, wird in Abschnitt 2.3.2 erläutert.

2.3.2 Versuchsaufbau zur Messung des adaptiven Photorezeptors

Wie die Messungen der Photodioden wurden die Messungen des adaptiven Photorezeptors am optischen Tisch der Dunkelkammer des ASIC-Labors durchgeführt. Weitere Einzelheiten bezüglich des Meßaufbaus sind dem Kapitel 3.2 zu entnehmen. Es wurden allerdings im Vergleich zur Messung der spektralen Quanteneffizienz der Photodioden einige Veränderungen vorgenommen. Als Lichtquelle diente ein Halbleiterlaser mit einer Wellenlänge von 675 nm und einer Strahlungsleistung von 10 mW. Durch eine Steuerspannung ist er über einen Frequenzbereich von 0 bis 100 MHz in der Ausgangsleistung modulierbar. Die Modulationstiefe beträgt allerdings maximal 80 %. In den Messungen, die in 2.4 beschrieben werden sollte aber ein Intensitäsbereich von mehr als 6 Dekaden zur Verfügung stehen. Dies konnte durch die zusätzliche Verwendung von sog. Neutralfiltern erreicht werden, die die Intensität jeweils um einen bestimmten Faktor abschwächen. Genauere Angaben zu den Neutralfiltern können auf den Seiten 47 bis 51 in [1] entnommen werden. Bei der Messung der Adaptationszeit des Testpixels (Kapitel 2.3.1) wurde nur eine Abschwächung auf 10 % benötigt, was durch Einbringen eines Filters erfolgte. Da jeder einzelne Filter bei seiner Abschwächung um 90 % nur einen Fehler von < 3 % aufweist spielte es keine Rolle, welchen Filter man für die Messung des Adaptationsverhalten verwendet.

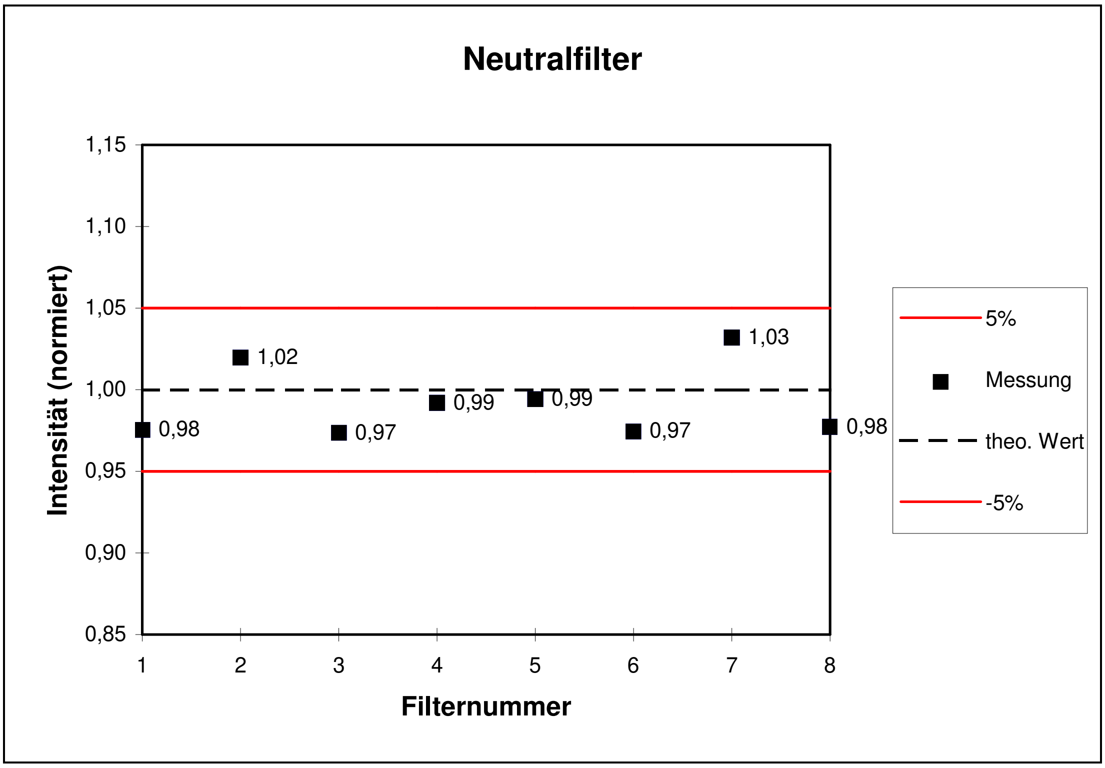

Bild 2.19: Abschwächung der einzelnen Neutralfilter

Bei dieser Messung wurde die Abschwächung jedes *einzelnen* Filters untersucht. Der Meßaufbau war der Gleiche wie in Kapitel 2.3.3.

Man sieht, daß die Meßwerte nur leicht um den theoretischen Wert der 10 %igen Abschwächung schwanken.

Wie sieht es aber aus wenn man eine größere Abschwächung messen möchte und mehrere Filter hintereinander schaltet ?

Zu erwarten wäre eine Abschwächung um jeweils eine Dekade pro Filter. Ob dies der Fall ist, wird in Abschnitt 2.3.3 erörtert.

2.3.3 Messung der Neutralfilter

In dieser Messung wurde die Güte des Neutralfiltersystems untersucht, das für alle Messungen am adaptiven Pixel verwendet wurde. Der mechanische Aufbau des Neutralfiltersystems ist in Kapitel 4.1.1 in [1] beschrieben. Das System besteht aus 8 einzelnen Filtern. Wenn sie alle nacheinander in einen Lichtstrahl eingeschoben werden, sollten sie dessen Intensität um 8 Dekaden abschwächen. Es wurde der Versuchsaufbau aus Kapitel 3.2 übernommen, bei dem die Xe-Lichtquelle durch den in 2.3.2 verwendeten Halbleiterlaser und der Monochromator durch die Neutralfilter ersetzt wurde. Wegen des begrenzten Meßbereichs des Photometers konnten nur 5 Filter gleichzeitig gemessen werden.

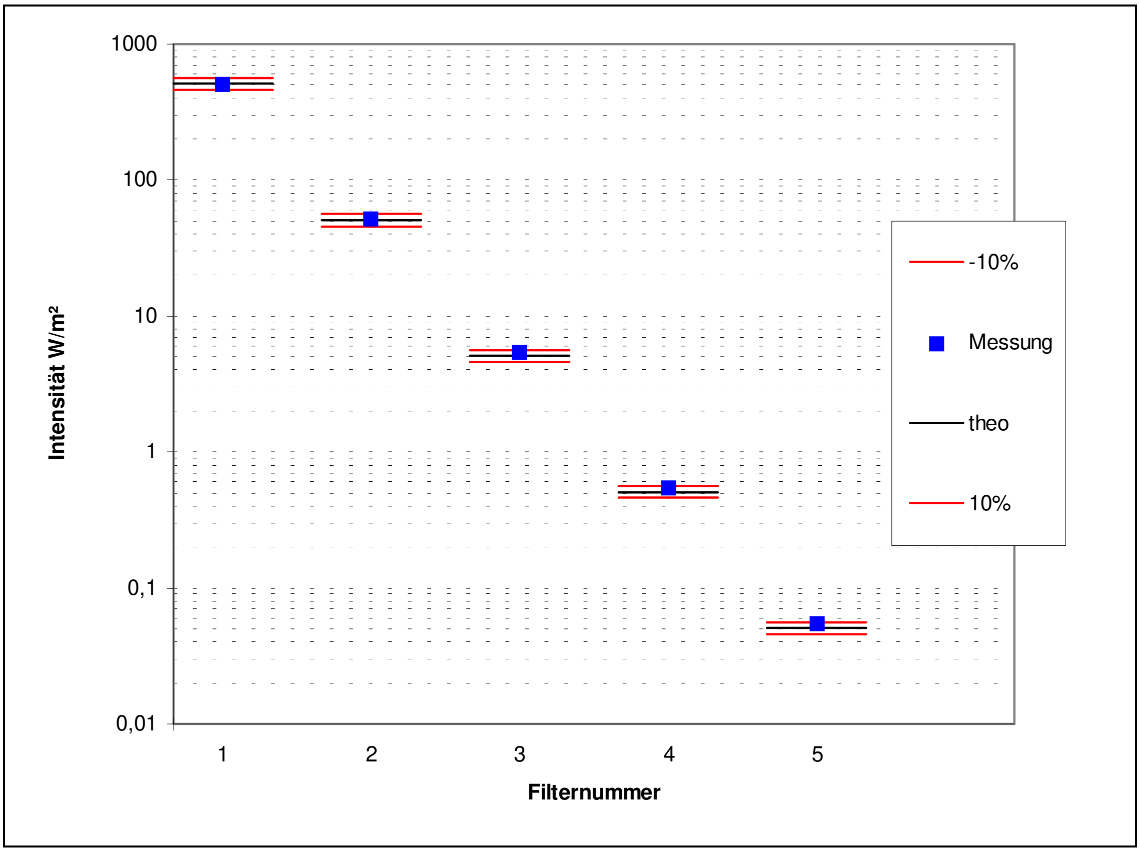

Bild 2.20: Messung der Neutralfilter über 5 Dekaden

Aus dem Diagramm ist abzulesen, daß das Neutralfiltersystem im Rahmen der Meßgenauigkeit von 10 % eine Intensitätsabschwächung von jeweils 90% pro Filter aufweist. Bei Messungen mit den drei übrigen Filtern haben sich die Ergebnisse bestätigt. Dies gilt jedoch nur für diese Messung. Da die Anordnung durch Reflexionen innerhalb des Neutralfiltersystems sehr empfindlich ist, und schon die kleinste Verschiebung des Lichtstrahls Auswirkungen auf die gemessene Intensität hat, muß man vor jeder Messung die Anordnung eichen, um sicherzustellen, daß die gewünschte Intensitätsabschwächung gewährleistet ist.

2.4 Testpixel mit Sourcefolger

Eine weitere Teststruktur auf dem Chip ist ein Standardpixel aus [1] an dem zwei Veränderungen gemacht wurden. Zum einen wurde das Layout des Pixel vom 1,2 µm CMOS-Prozeß in das Layout des 0,8 µm CMOS-Prozeß umgewandelt und zum anderen wurde der Ausgang des Pixels mit einer Sourcefolgerschaltung versehen, die den Vorteil bringt, daß der Ausgangswiderstand des Pixels kleiner ist und damit die Ausleseleitung (große Kapazität) schneller umgeladen werden kann.

Gleichzeitig bewirkt dies eine Entkopplung von Pixelschaltkreis und Auslese. Bild 2.21 zeigt das Layout des Pixels.

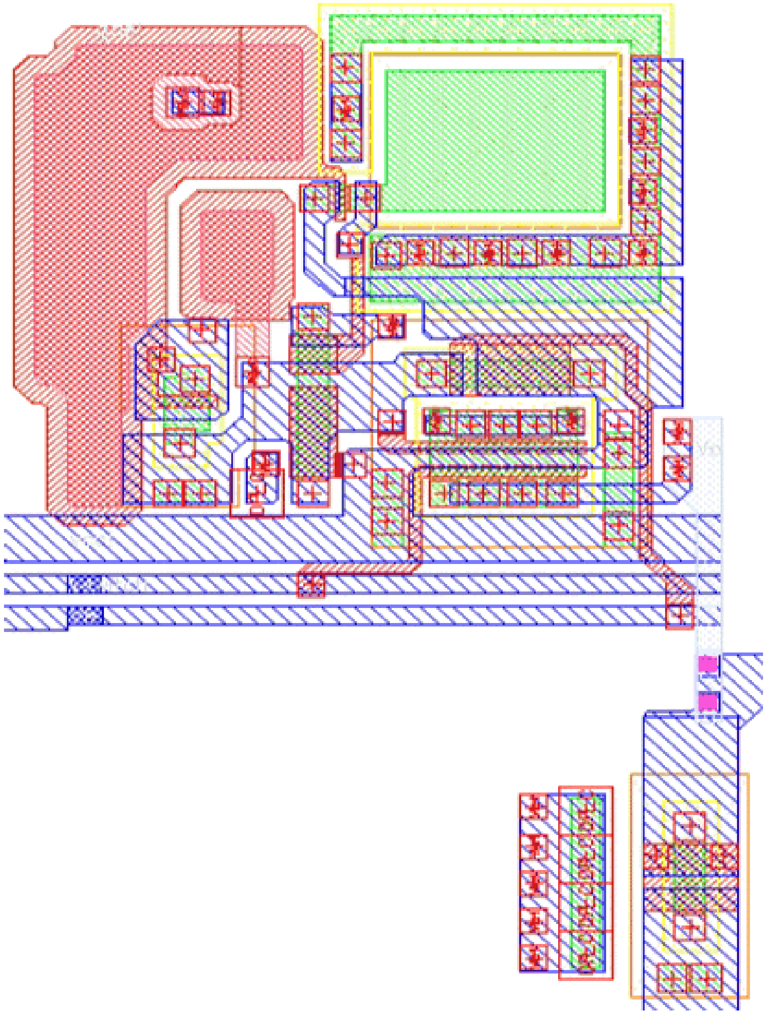

Bild 2.21: Layout des Testpixels mit Sourcefolger

Der Aufbau dieses Pixels ist gegenüber dem das Pixels mit SC (Bild 2.13) etwas verändert, was nur layouttechnische Gründe hat, da die Werte der einzelnen Bauteile gleich sind.

2.4.1 Messungen am Testpixel mit Sourcefolger

Der elektronische Photorezeptor zeichnet sich vor allem durch sein Adaptationsverhalten und seine damit verbundene unterschiedliche Reaktion auf schnelle (transiente Antwort) bzw. langsame Intensitätsänderungen (statische Antwort) aus. Die transiente und die statische Antwort sind an diesem Pixel untersucht worden. Die Messungen erfolgten über einen Dynamikbereich von 11 Dekaden, der mit Hilfe des Lasers (Wellenlänge 675 nm) und der Neutralfilter zur Verfügung stand.

Ein Photometer erlaubte dabei eine absolute Eichung der Intensitätsskala. Der Laserstrahl wurde auf einen Durchmesser von ca. 1 mm fokussiert. Auf diese Weise konnte der vollständige Pixel mit seiner Umgebung beleuchtet werden, was den realen Bedingungen für den Einsatz des Chips in einer Kamera entspricht. Die genaue Vorgehensweise der Messung kann in Kapitel 5 in [1] nachgelesen werden.

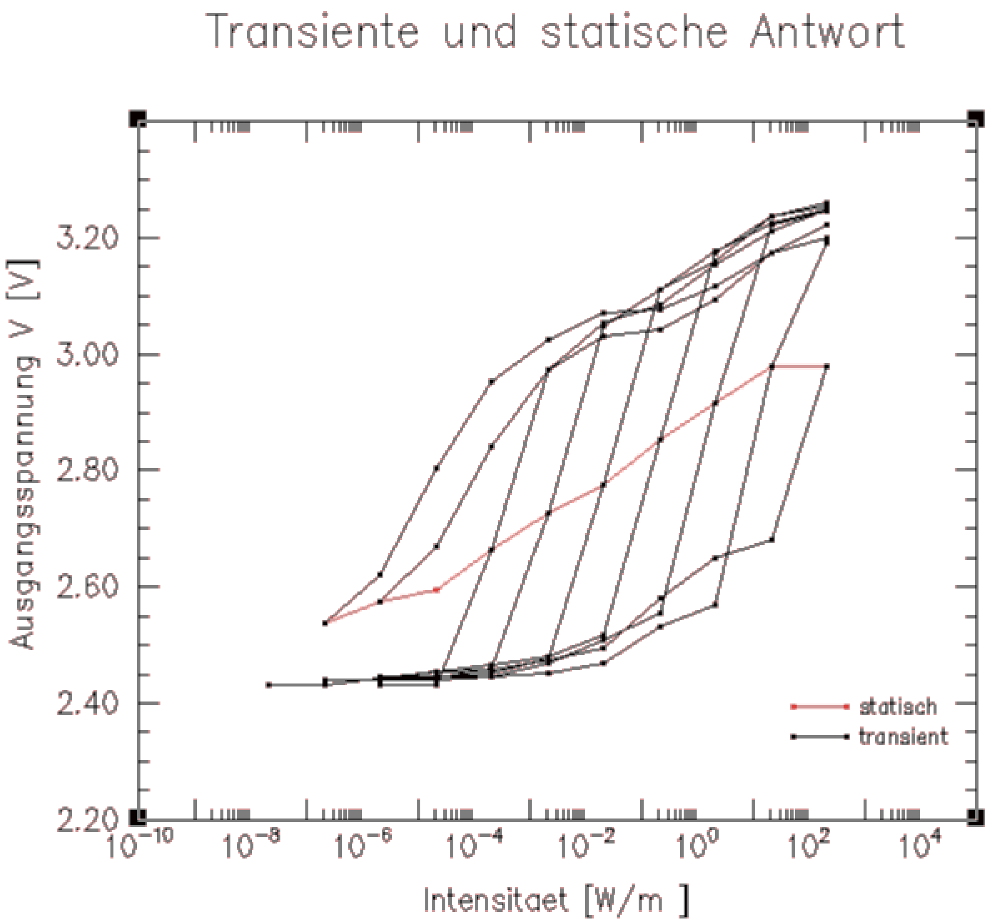

Bild 2.22: Messung des Antwortverhaltens beim Testpixel mit Sourcefolger. Es ist die Ausgangsspannung des adaptiven Pixels für die transiente Antwort und für die statische Antwort über der Beleuchtungsintensität aufgetragen.

Die Messung des Pixel mit Sourcefolger weist über einen Dynamikbereich von etwa 7 Dekaden (10^{-5}-10^{2} W/m^2) qualitativ das gleiche Verhalten wie die Messung am Schildkrötenzapfen [16] auf. Die statische Antwort zeigt einen leicht ansteigenden Verlauf, während die transiente Antwort mit deutlich verstärkter Reaktion erfolgt. Das Verhältnis zwischen den beiden Signalverstärkungen unterscheidet sich allerdings etwas von dem des biologischen Vorbildes. Während bei dem Testpixel das Verhältnis zwischen transientem Signal zu statischem Signal etwa 10:1 beträgt, hat man ein Verhältnis beim Schildkrötenzapfen von 5:1 [16]. Der elektronische Rezeptor zeigt also eine geringere Kontrastempfindlichkeit für statische Objekte, reagiert aber mit einer höheren Bewegungserkennung als der Schildkrötenzapfen.

3 Spektrale Quanteneffizienz

3.1 Theoretische Grundlagen

Bei Photodioden besteht für normale Bestrahlungsstärken eine strenge Proportionalität zwischen der Zahl der Photoelektronen geteilt durch die Zeit (Photostrom) und der einfallenden Bestrahlungsstärke. Der Aufbau und die Wirkungsweise der Photodiode wird mit folgender Abbildung näher erläutert:

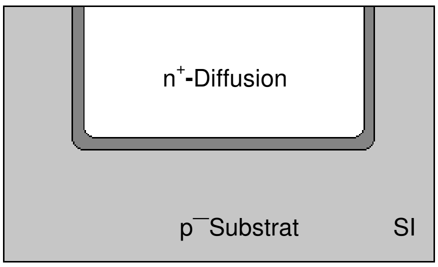

Bild 3.1: Schematischer Aufbau einer n^+-Substrat-Diode

Die n^+-Substrat-Diode besteht aus einer dotierten Diffusionsschicht aus n-Silizium (Elektronenüberschußleitung durch As-Zusatz), die in ein Substrat aus schwach dotiertem p-Silizium (Defektelektronenleitung durch Bor-Zusatz) eingebettet ist. Infolge des Konzentrationsgefälles der Elektronen von der n- zur p-Schicht (und umgekehrt für die Defektelektronen) bilden sich durch Diffusion dieser Ladungsträger Raumladungen zu beiden Seiten der Grenzschicht zwischen p- und n-Leiter aus. Hierdurch entsteht ein elektrisches Feld, das von der n- zur p-Schicht gerichtet ist und weitere Diffusion verhindert. Wenn nun die Diode mit Licht bestrahlt wird, das durch die lichtdurchlässige Schicht in die Diode eindringt, werden Elektronen ausgelöst., die durch das eben erwähnte Feld in die n-Schicht gezogen. Diese Änderung der Ladungsverteilung gegenüber dem vorher eingestellten Gleichgewicht erzeugt eine Spannung.

Verbindet man diese beiden äußeren Schichten durch einen äußeren Stromkreis, so fließen die lichtelektrisch ausgelösten Elektronen als Photostrom durch diesen Kreis.

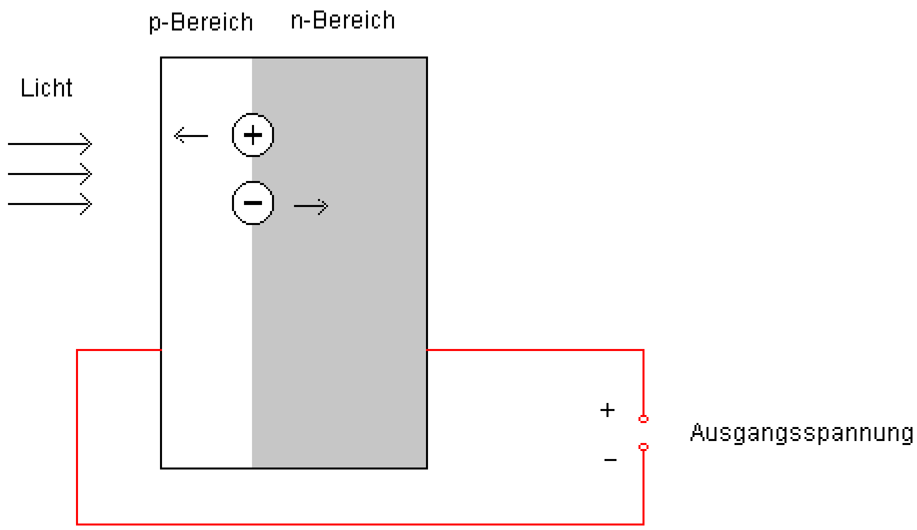

Bild 3.2: Schematischer Aufbau eines p-n-Übergangs

Da die Elektronenausbeute von der spektralen Verteilung des Lichtes abhängt, wurden die verschiedenen Dioden in den folgenden Messungen nicht mit einem Frequenzgemisch bestrahlt, sondern mit monochromatischem Licht. Wie groß nun die Empfindlichkeit und die maximale Quantenausbeute für die auf dem Chip befindlichen Dioden ist, wird in den nächsten Kapiteln gezeigt.

Allgemeine Definition: Das Verhältnis von ausgelöstem Photostrom I zu eingestrahlter Strahlungsleistung P wird photoelektrische Empfindlichkeit γ genannt.

$$\gamma = \frac{I}{P} \qquad (3.1)$$

γ = photoelektrische Empfindlichkeit
I = Photostrom
P = Strahlungsleistung

Nicht jedes eingestrahlte Photon löst ein Photoelektron aus, auch wenn seine Frequenz größer als die Grenzfrequenz des betreffenden Materials ist. Das Verhältnis von Zahl der ausgelösten Elektronen n_e zur Zahl der eingestrahlten Photonen n_p wird Quanteneffizienz Q genannt.

(3.2)

$$Q = \frac{n_e}{n_p}$$

Q = Quanteneffizienz
ne = Zahl der ausgelösten Elektronen
n_p = Zahl der eingestrahlten Photonen

Um nun Q experimentell zu bestimmen, muß die Zahl der ausgelösten Elektronen und die Zahl der eingestrahlten Photonen gemessen werden.

Die Zahl der ausgelösten Elektronen pro Zeit ergibt sich aus dem Quotienten von Photostrom I_p und der Elementarladung e.

$$n_e = \frac{I_p}{e}$$

n_e = Zahl der ausgelösten Elektronen
I_p = Photostrom
e = Elementarladung (1,6 E-19 As)

(3.3)

Die Zahl der eingestrahlten Photonen ergibt sich aus dem Quotienten der Strahlungs – energie pro Zeit *(Leistung P)* und der Energie des Photons $\frac{h \cdot c}{\lambda}$.

$$n_p = \frac{P \cdot \lambda}{h \cdot c}$$

n = Zahl der eingestrahlten Photonen
P = Strahlungsleistung
λ = Wellenlänge der monochrom. Strahlung
h = Plancksches Wirkungsquantum (6,626 E-34 Js)
c = Lichtgeschwindigkeit (3 E 8 m/s)

(3.4)

Damit ergibt sich für die Quanteneffizienz:

$$Q = \frac{n_e}{n_p} = \frac{I_p}{P \cdot \lambda} \cdot \frac{h \cdot c}{e} \qquad \text{mit} \quad \frac{h \cdot c}{e} = 1{,}24 \text{ E-6 WmA}^{-1}$$

(3.5)

Man muß demnach nur den Photostrom I_P und die Strahlungsleistung P bei der zugehörigen Wellenlänge λ messen, um die spektrale Quanteneffizienz für die auf dem Chip befindlichen Dioden zu errechnen.

3.1.1 Die Photodioden

Auf dem Testchip befinden sich 4 verschiedene n^+-Substrat-Dioden mit verschiedenen Abschirmungen, die auf Ihre spektrale Quantenausbeute untersucht wurden.

Folgende Abbildung zeigt das Layout der vier verschiedenen Photodioden auf dem Chip.

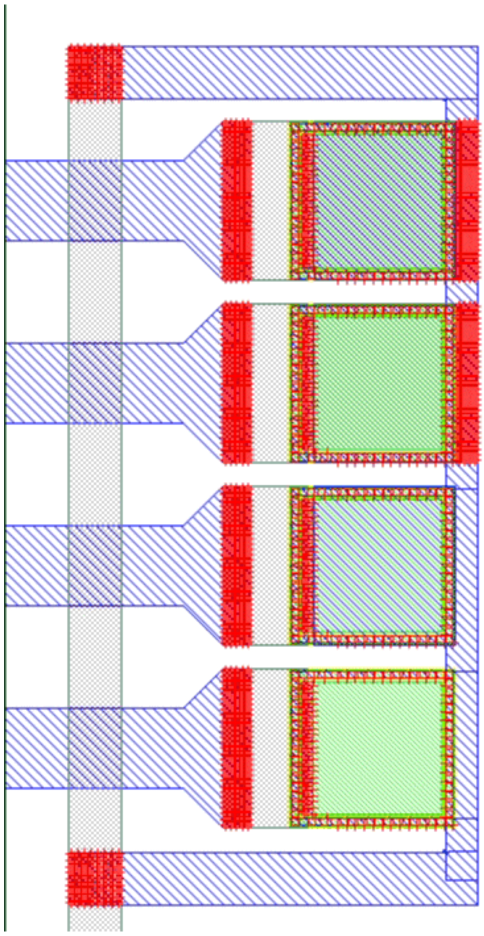

Bild 3.3: Layout der 4 Photodioden

Alle 4 Dioden haben die gleichen Abmessungen von 87 x 85 µm.

Diode 1 hat keine Abschirmung. Die anderen drei Dioden sind mit Aluminium überzogen. Diode 2 ist mit einer Lage Metall 1 (0,6 µm ± 0,05 µm) abgeschirmt, Diode 3 ist mit einer Lage Metall 2 (1,0 µm ± 0,1 µm) abgeschirmt und bei Diode 4 wurde sowohl mit einer Lage Metall 1 als auch eine Lage Metall 2 abgeschirmt. Über der Diode liegt noch eine passivierende Nitrid-Schicht von 1,0 µm ± 0,1 µm, die für die Reflexionen des Licht und somit für die in den Diagrammen 3.8 - 3.11 zu erkennenden Interferenzerscheinungen verantwortlich ist.

Der Aufbau dieses Versuchs und die Durchführung wird in Abschnitt 3.2 beschrieben.

3.2 Versuchsaufbau

Während die Messungen des Switched Capacitors bequem mit Hilfe einiger Meßgeräte und der Testplatine auf einem Laborarbeitsplatz gemacht werden konnten, waren die

Messungen der optischen Strukturen etwas aufwendiger. Die Versuche wurden in der Dunkelkammer des ASIC-Labors (Resthelligkeit < 100 nW/m^2) durchgeführt. Der Meßaufbau, der in Bild 3.7 schematisch dargestellt ist, wurde auf einem schwingungsisolierten Tisch montiert, der Gebäude- und Trittschwingung weitgehend abdämpft. Die Tischplatte ist auf Luftpolstern gelagert und hat eine Eigenfrequenz von etwa 2 Hz, was deutlich unter den für Bodenerschütterungen typischen Frequenzen von 30 - 100 Hz liegt. Es ist sehr wichtig, daß derartige optischen Messungen auf einem schwingungsisolierten Tisch durchgeführt werden, da schon die kleinste Erschütterung die aufwendige Justierung des Lichtstrahls zunichte macht.

Der Chip sitzt in einem Sockel auf dem Testboard, das die zu den Messungen benötigten Schaltungen beinhaltet. Es wurde an einen X-Y-Fahrtisch befestigt, der mittels einer Schrittmotorsteuerung senkrecht zur optischen Achse bewegt wurde.

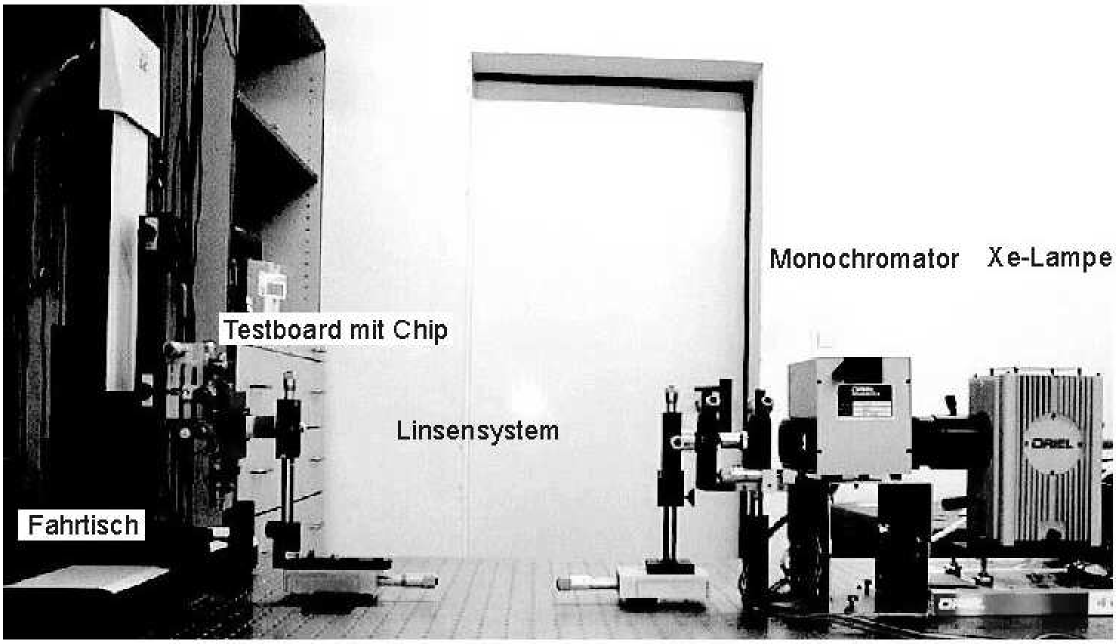

Bild 3.4: Photo des Versuchsaufbaus

3.2.1 Xe-Bogenlampe

Bei der Lichtquelle handelt es sich um eine 75 Watt Xe-Bogenlampe, die bei Wellenlängen zwischen 400 nm und 800 nm eine nahezu gerade spektrale Ausgangskennlinie (mit einigen Spitzen) liefert.

Bild 3.5 zeigt die vom Hersteller gelieferte Meßkurve dieser Xe-Lampe.

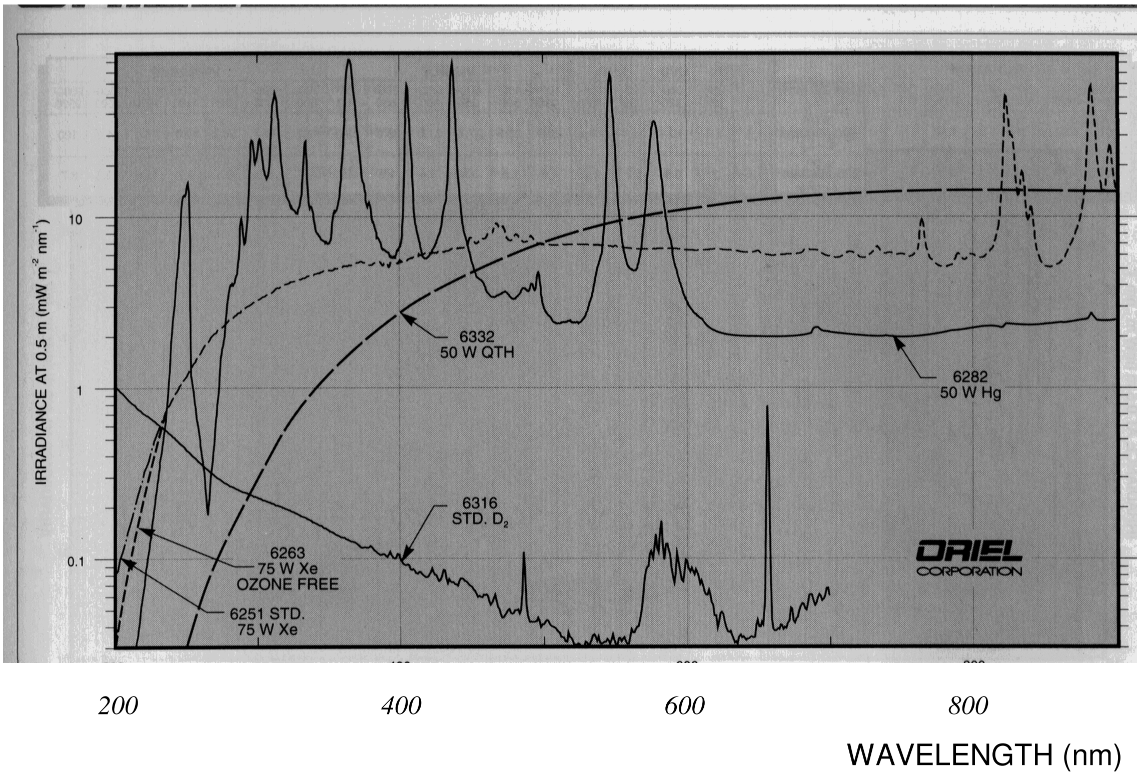

Bild 3.5: Spektrale Empfindlichkeitskurve der 75 W Xe-Bogenlampe. Entnommen aus [21].

3.2.2 Monochromator

Ein Monochromator blendet eine Linie oder einen sehr schmalen Spektralbereich aus einem breiten Spektrum aus. Er besitzt in der Brennebene des Objektivs einen Austrittsspalt, an dem das Spektrum bei einer Drehung Gitters vorbeiwandert.

Der in der Versuchsanordnung verwendete Monochromator hat eine Brennweite von 125mm und ein Öffnungsverhältnis: f/3,7 mit lateralem Ein- und Ausgang. Zur Ausstattung gehören wahlweise Handantrieb oder Motorsteuerung mit Wellenlängenanzeige in nm (dreistellig mit 0,2 nm Index). Verwendet wurde ein Gitter mit 1200 Linien/mm, das für Wellenlängen ab 450 nm geeignet ist.

Die Spaltbreite wurde mit einer Hg(Ar)-Spectral-Calibration-Lamp kalibriert, die in ihrem charakteristischen Spektrum eine Linie bei 615,0 nm aufweist.

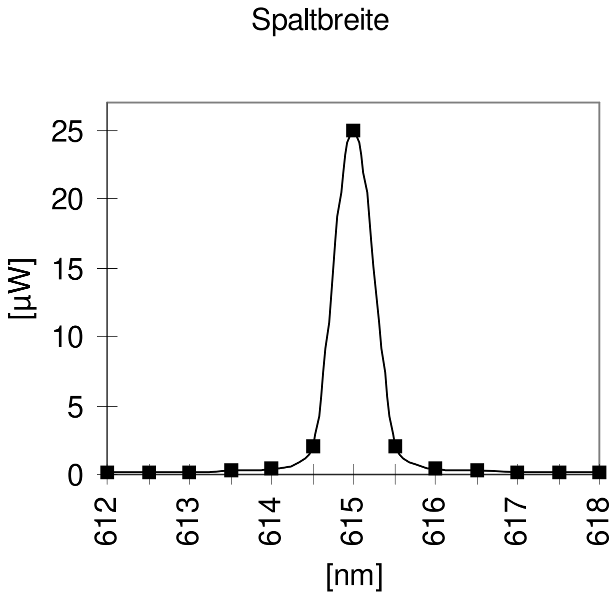

Bild 3.6: Messung der Spaltbreite des Monochromators

Man sieht, daß die Wellenlänge auf ±0,5 nm genau bestimmt werden kann.

Die Steuerung des Motors erfolgte über eine serielle Schnittstelle eines PCs. Mit Hilfe der Programmiersprache Q-Basic[12] können Steuerbefehle an den Schrittmotor gegeben werden.

3.2.3 Objektive mit Blende

Mit Mikroskopobjektiven, die mit Mikrometerschrauben in verschiedene Richtungen justierbar sind, und einer Lochblende (∅ = 5µm), läßt sich bei exakter Einstellung, auf dem Chip ein Spot mit einem Durchmesser von bis zu 5µm erreichen. Um die Größe des Fokusdurchmessers zu bestimmen, wurde eine auf dem Chip befindliche längliche Randdiode verwendet. Diese ist in gewissen Abständen mit Metalleitungen abgedeckt, welche die Verbindung zwischen den Anschlußpads und der Chipelektronik herstellen. Wird nun der Lichtfleck entlang der schmalen Photodiode auf eine solche Metalleitung bewegt, so sieht die Diode immer weniger Intensität, bis das Licht schließlich vollständig durch die Metallschicht abgeschirmt wird. Der Abstand zwischen dem Punkt, an dem der Photostrom beginnt schwächer zu werden, und dem Punkt, an dem der Photostrom sein Minimum erreicht, gibt den Durchmesser des Lichtflecks an.

[12]Q-Basic: einfache Programmiersprache, die Bestandteil des Betriebssystems MS-DOS ist.

3.2.4 Testboard mit Chip

Auf dem in Bild 2.2 gezeigten Testboard befinden sich nicht nur die Schaltungen für die Auslese des Switched Capacitors, sondern auch die nötige Peripherie zur Messung der optischen Teststrukturen des Chips, wie z.B. Ein- und Ausgänge, Schalter und Regler zur Ansteuerung der Photodioden und Testpixel. Die peripheren Schaltungen, die zur Auslese des Testchips nötig sind, werden in Kapitel 4.2 in [1] eingehend erklärt.

3.2.5 Fahrtischsteuerung

Die Größe der CMOS-Strukturen liegt im Bereich einiger Mikrometer. Zu Ihrer Untersuchung muß der fokussierte Laserstrahl genau auf dem Chip positioniert werden können. Dies wird durch einen Fahrtisch erreicht, der nicht den Lichtstrahl selbst, sondern die Testplatine mit dem Chip in der XY-Ebene senkrecht zur Strahlrichtung bewegt. Der Fahrtisch besteht aus zwei gleichartigen Linearverstellern[13], die jeweils einen Verstellweg von 30 cm bei einer Positionsauflösung von 1 µm aufweisen. Die Positionsreproduzierbarkeit liegt sogar bei 0,1 µm. Das Funktionsprinzip beruht auf einem mit einem Gleichstrommotor realisierten Spindelantrieb und einer optischen Positionserfassung (Drehscheibe auf der Antriebsspindel mit 2000 Unterteilungen). Dabei werden in einem Regelkreis die Soll-Position und die Ist-Position miteinander verglichen und bei Abweichungen entsprechende Steuersignale an den Motor ausgegeben. Die Regelung erfolgt nicht nur für die Ortsposition, sondern auch für die Beschleunigung, Geschwindigkeit und Abbremsverhalten. Die Ansteuerung des Fahrtisches erfolgte über eine serielle Schnittstelle. Als Steuerungsrechner wurde ein auf der 68030 CPU von Motorola basierendes System verwendet, das in erster Linie als Kontrolleinheit für das sog. CAMAC[14]-Crate eingesetzt wird. Die notwendige Steuerungssoftware wurde in der Programmiersprache C von Markus Loose geschrieben. Der Rechner selbst läuft unter dem Echtzeitbetriebssystem OS-9.

3.3 Messung

Wie im letzten Abschnitt erwähnt wurde, gibt es zur Bestimmung der Quanteneffizienz der Photodioden 3 Größen, die gemessen werden müssen: Der Photostrom I_p, die Strahlungsleistung P und die dazugehörige Wellenlänge λ.

Im Gegensatz zu der Messung der Testpixel, bei denen ein Spot von etwa 5 µm benötigt wurde, war der Lichtfleck zur Messung der Photodioden etwa im Durchmesser ca. 50 µm groß. Für jede Diode wurde eine Kurve *Photostrom vs. Wellenlänge* aufgenommen. Die Messung des Photostromes konnte sehr komfortabel mit einem Parameteranalysator (Meßgerät zur sehr genauen Bestimmung von Halbleiterkennlinien) gemacht werden,

---

[13] Linearversteller M-535.21 kombiniert mit dem Motor Controller C-804.10 der Firma Physik Instrumente in Waldbronn [17]

[14] CAMAC: **C**omputer **A**pplications to **M**easurment and **C**ontrol

da dieses Gerät sogar noch Ströme im fA-Bereich aufnehmen und die Daten auf Diskette abspeichern kann.

Im ersten Teil des Versuches wurde die Strahlungsleistung in Abhängigkeit von der Wellenlänge gemessen. Dazu wurde anstelle des Chips ein Photometer[15] angebracht. Dieses Meßgerät verfügt über eine serielle RS 232-Schnittstelle, sodaß die Ansteuerung, die Auslese der Meßdaten und die Verarbeitung dieser Daten bequem über einen PC erfolgte. Das Programm dazu wurde in der Programmiersprache Q-Basic geschrieben, und ist jederzeit vom Mess-PC der Dunkelkammer des ASIC-Labors abrufbar.

Bild 3.7 zeigt den schematischen Aufbau der Versuchsanordnung.

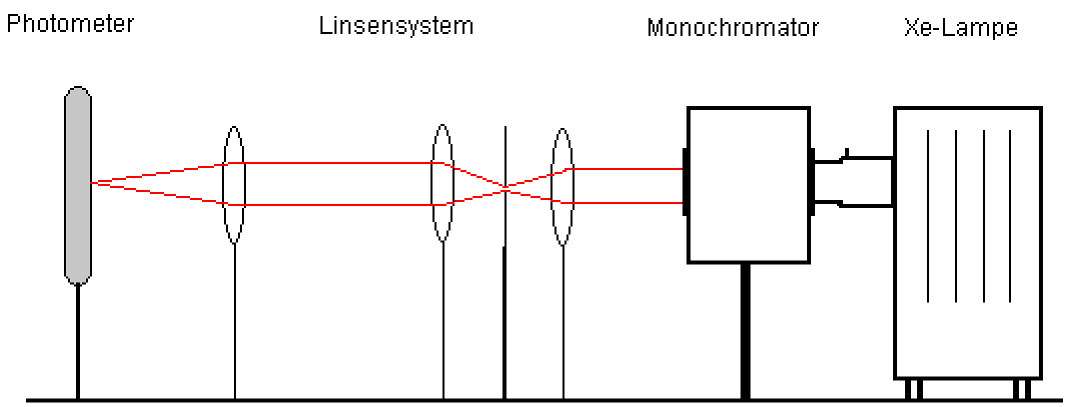

Bild 3.7: Schematischer Aufbau der Versuchsanordnung

Das Ergebnis dieser Messung war die Kurve *Strahlungsleistung vs. Wellenlänge*, die anschließend kalibriert wurde mit der relativen spektralen Empfindlichkeitskurve des Photometers.

Die nächste Abbildung zeigt diese Empfindlichkeitskurve, die vom Hersteller des Photometers geliefert wurde, und nicht nachgemessen werden konnte.

[15] Photometer: mißt Strahlungsleistung in [W] oder Strahlungsintensität in [W/m]

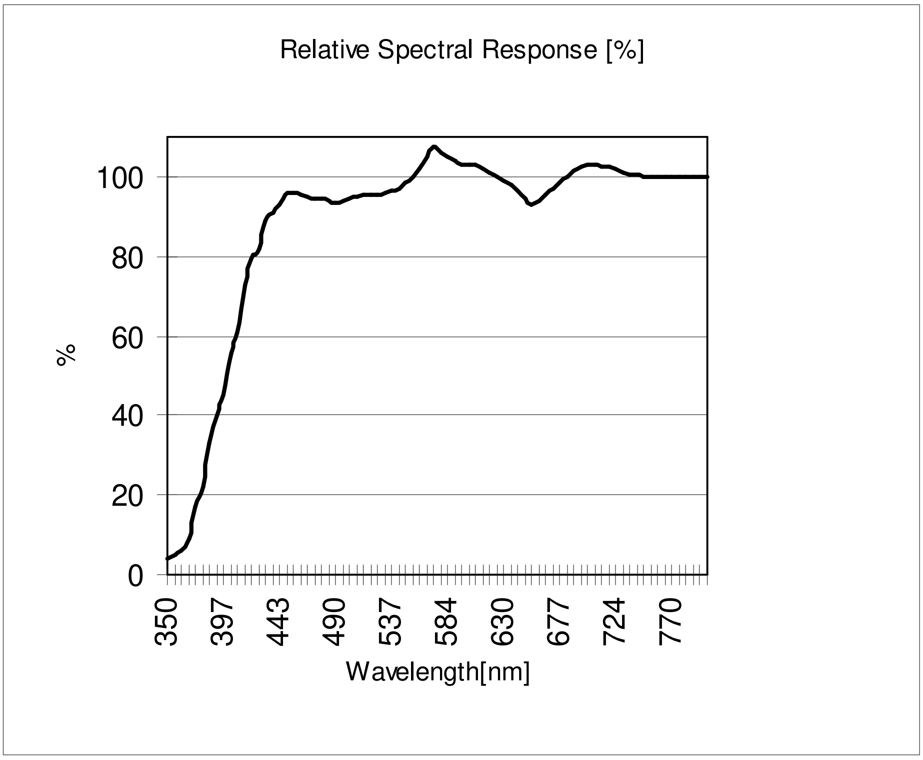

Bild 3.8: Eichkurve des Photometers

Die daraus resultierenden Werte ergeben abzüglich des Dunkelstromes der Diode die tatsächliche Kurve der *Strahlungsleistung vs. Wellenlänge*, die dann im PC gleich mit den Werten des Photostromes zur Kurve der ***Quanteneffizienz vs. Wellenlänge*** umgerechnet wurde.

3.4 Meßergebnisse

3.4.1 Diode ohne Abschirmung

Bild 3.9 zeigt die Quanteneffizienzkurve der 0,8µm-CMOS n^+-Substrat-Diode ohne Abschirmung. Da das Gitter erst ab einer Wellenlänge von 450 nm arbeitet, liefert die Messung für Wellenlängen< 450 nm keine brauchbaren Ergebnisse.

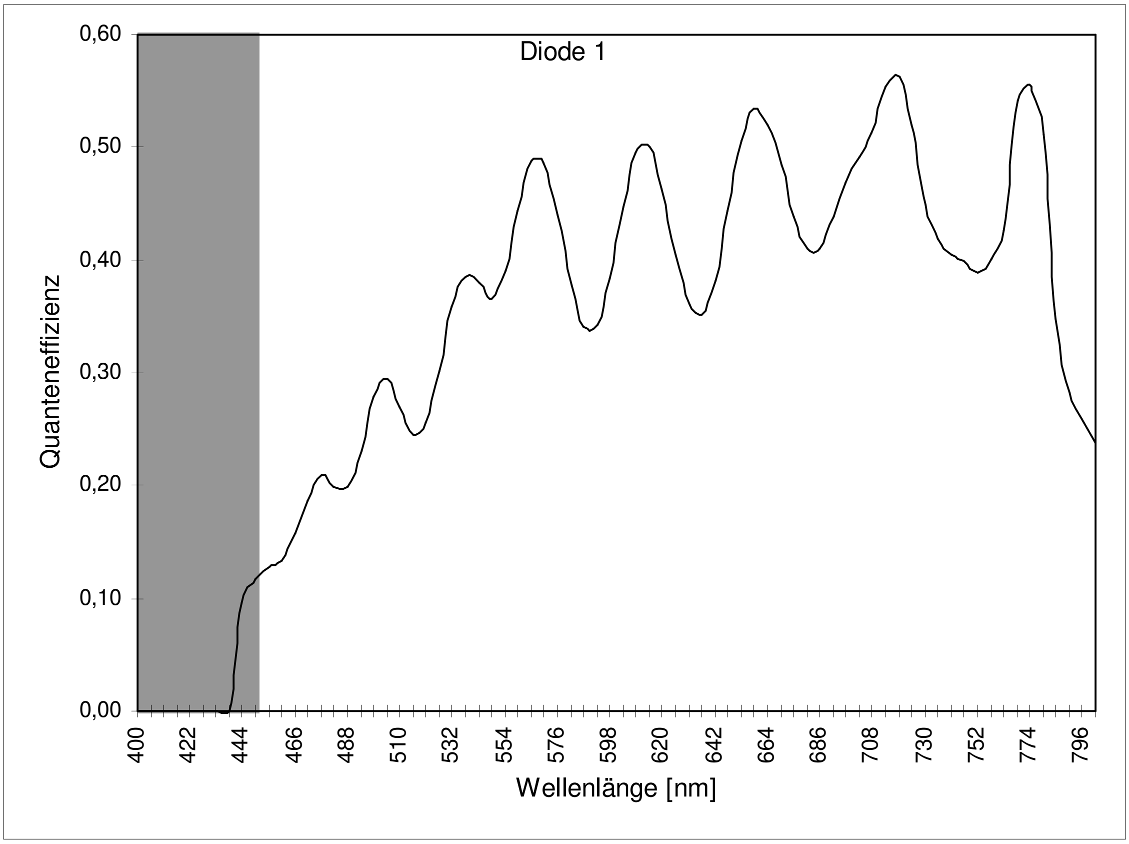

Bild 3.9: Diode ohne Abschirmung. Quanteneffizienz vs. Wellenlänge

Man sieht deutlich die Interferenzerscheinungen, die von der Nitrid-Passivierungsschicht herrühren. Weiter kann man einen Abfall der Kurve zu kleinen Wellenlängen hin beobachten. Der Grund dafür ist, daß die Absorptionslänge[16].eine Frequenzabhängigkeit aufweist. Kurzwelliges Licht (blau) wird sehr stark absorbiert während langwelliges Licht (rot) etwa 10-fach stärker eindringt und somit eine deutlich größere Absorptionslänge hat.

Das Maximum erreicht die Quanteneffizienz mit 0,56 bei etwa 720 nm und bei 775 nm.

[16] Absorptionslänge: die Strecke, nach der die Anzahl der Photonen um das e^{-1}-fache abgefallen ist.

3.4.2 Diode Metall 1

Bild 3.10 zeigt die Quanteneffizienzkurve der 0,8µm-CMOS n^+-Substrat-Diode mit einer Abschirmung in Form einer ca. 0,65 µm dicken Metall 1-Lage.

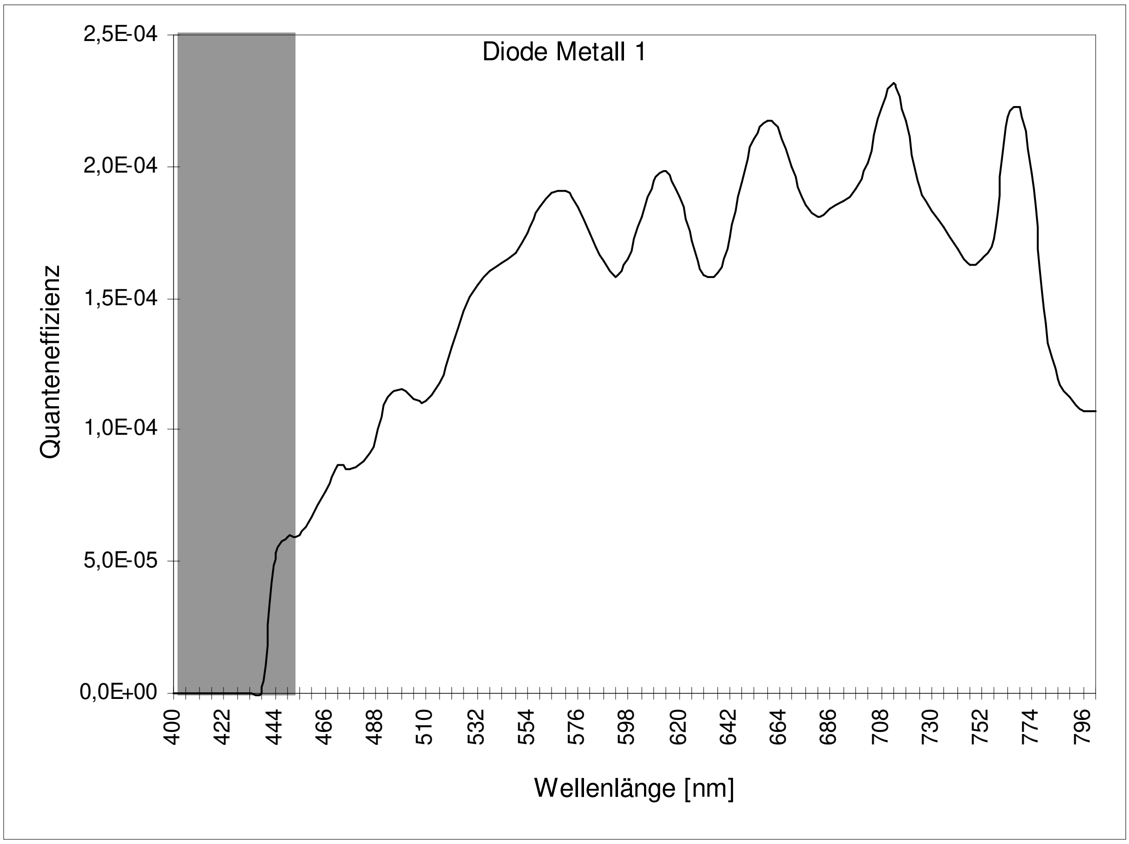

Bild 3.10: Diode mit Abschirmung Metall 1. Quanteneffizienz vs. Wellenlänge

Die Interferenzerscheinungen liegen bei den gleichen Wellenlängen wie bei der Diode ohne Abschirmung.

Man sieht auch deutlich den Abfall der Quanteneffizienz hin zu kleinen Wellenlängen.

Der *Dämpfungsfaktor* der Diode mit Metall1-Abschirmung gegenüber der Diode ohne Abschirmung, der gebildet wurde aus dem arithmetischen Mittel der einzelnen Dämpfungsfaktoren der jeweiligen Wellenlängen beträgt **2350**.

3.4.3 Diode Metall 2

Bild 3.11 zeigt die Quanteneffizienzkurve der 0,8µm-CMOS n^+-Substrat-Diode mit einer Abschirmung in Form einer ca. 1,0 µm dicken Metall 2-Lage.

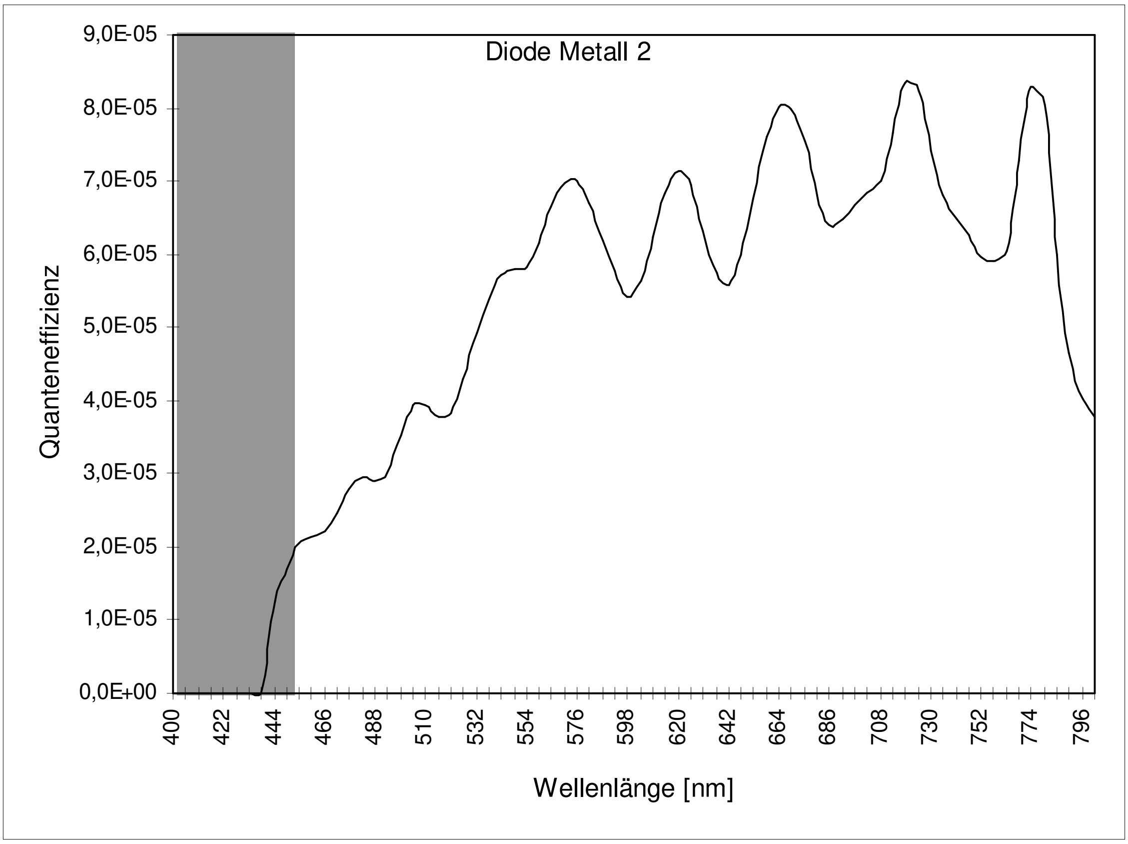

Bild 3.11: Diode mit Abschirmung Metall 2. Quanteneffizienz vs. Wellenlänge

Wieder erkennt man die Interferenzen und den Abfall der Quanteneffizienz bei den gleichen Wellenlängen wie bei den vorherigen Dioden.

Der *Dämpfungsfaktor*, der für diese Diode ermittelt wurde liegt bei **6739**. Er liegt um das 2,9fache höher als bei der Diode mit Metall 1-Abschirmung, da die Metall 2-Lage etwas dicker ist.

3.4.4 Diode Metall 1+2

Das nächste Diagramm zeigt die Quanteneffizienzkurve der 0,8µm-CMOS n^+-Substrat-Diode mit einer Abschirmung in Form einer ca. 0,65 µm dicken Metall 1-Lage und einer 1,0 µm dicken Metall 2-Lage.

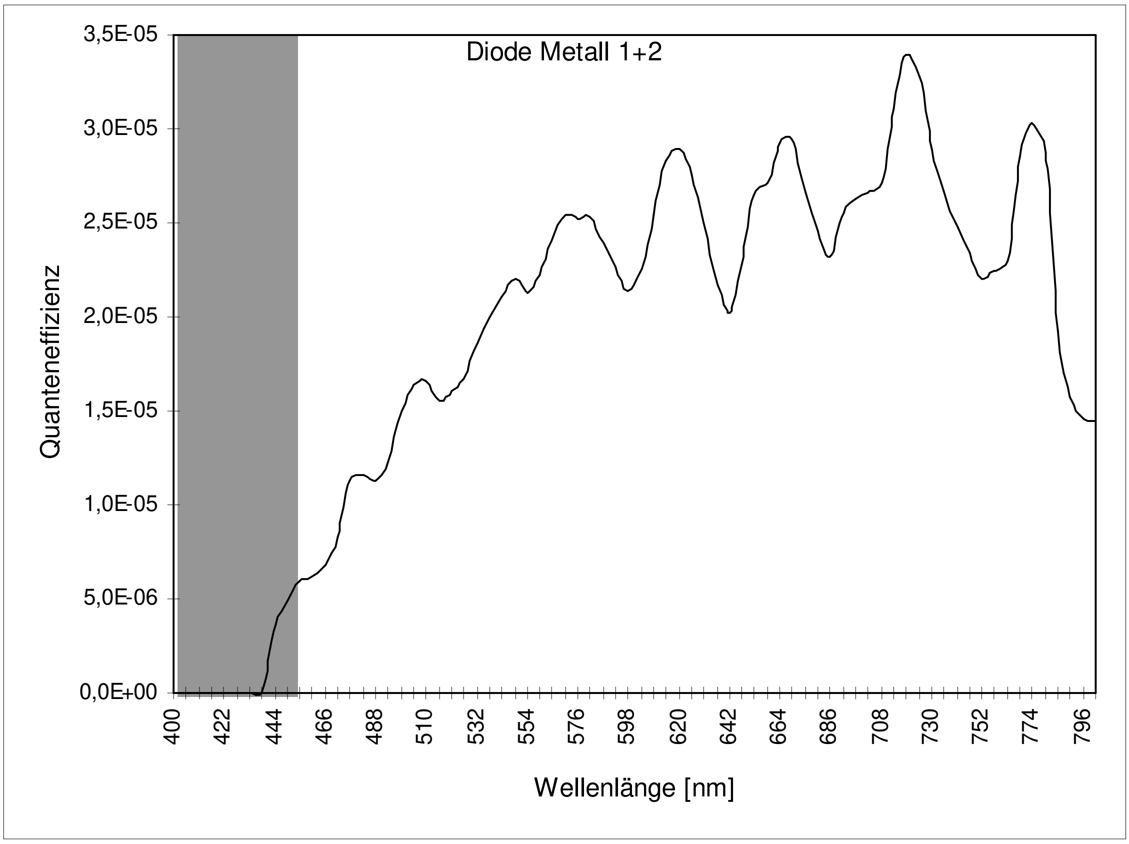

Bild 3.12: Diode mit Abschirmung Metall 1 + Metall 2 Quanteneffizienz vs. Wellenlänge

Man sieht die gleichen Phänomene, die bei den vorherigen Dioden zu beobachten waren.

Der *Dämpfungsfaktor* der 0,8µm-CMOS CMOS n^+-Substrat-Diode mit der Abschirmung Metall 1 und Metall 2 beträgt **18065**.

Die Eindringtiefe der Strahlung in das Metall ist der Kehrwert des Absorptionskoeffizienten. Nach Durchlaufen der Eindringtiefe 1/a klingt die Intensität mit dem Faktor 1/e ab. Das Zustandekommen des Meßfehlers beim Dämpfungsfaktor kann mehrere Ursachen haben. Man sieht, daß beim Auftragen der Verhältnisse $\frac{Kurve3.10}{Kurve3.9}$, $\frac{Kurve3.11}{Kurve3.9}$ und $\frac{Kurve3.12}{Kurve3.9}$ die zu erwartenden Geraden herauskommen. Die Ursache kleinen Schwingungen, die man erkennen kann sind wohl im systematischen Fehler des Meßaufbaus zu suchen. Denn die größte Schwierigkeit der Messung lag darin, die Zeitbasis für alle 4 Messungen zu synchronisieren. Bei der kleinsten Unregelmäßigkeiten der Zeiteinstellung liegen die Maxima und Minima der Meßkurven nicht mehr übereinander, und dadurch kommt es zu Oszillationen, wie sie in Bild 3.13 - Bild 3.15 zu sehen sind.

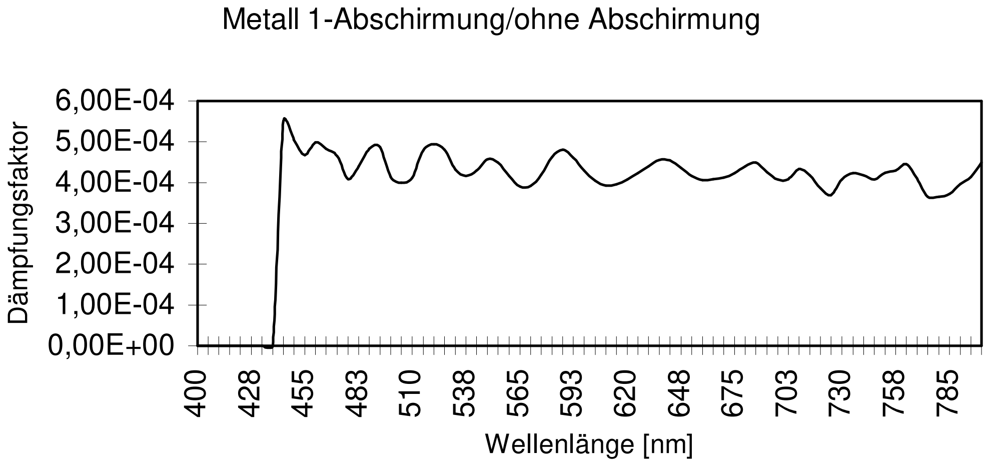

Bild 3.13:Plot des Verhältnisses $\frac{Kurve3.10}{Kurve3.9}$

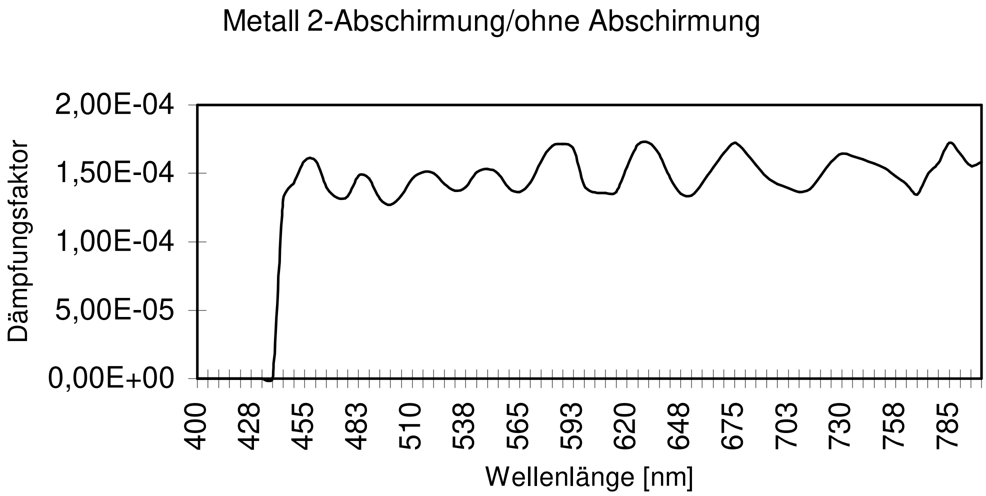

Bild 3.14 :Plot des Verhältnisses $\frac{Kurve3.11}{Kurve3.9}$

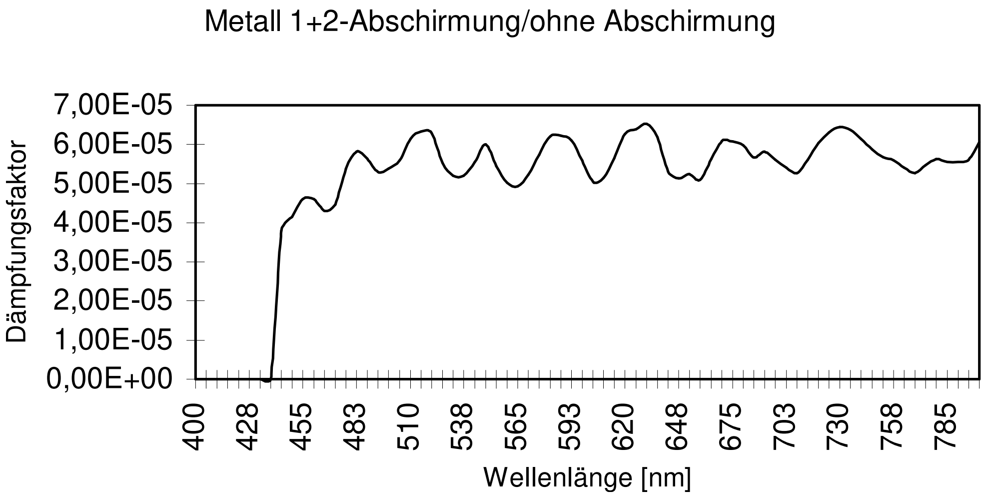

Bild 3.15 :Plot des Verhältnisses $\frac{Kurve3.12}{Kurve3.9}$

Aufgrund dieser Messungen kann man sagen, daß im Rahmen der Meßgenauigkeit der Dämpfungsfaktor der verschiedenen 0,8 µm-CMOS n^+-Substrat-Dioden über den Wellenlängenbereich von 450 bis 800 nm konstant ist

4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Teststrukturen designed und gemessen. Die Messung des Switched Capacitors zeigte, daß man auf relativ einfache Art und Weise in CMOS-Technologie einen Widerstand layouten kann, der mehrere sehr nützliche Eigenschaften mit sich bringt: hohe, einstellbare Widerstandswerte bei platzsparendem Layout. Die Messungen zu den adaptiven Pixeln haben einige neue Erkenntnisse gebracht. Im Zusammenhang mit einer integrierten SC-Schaltung kann man flexiblere Strukturen aufbauen als bisher mit dem Pixel mit fest eingestellter Adaptationszeit, obwohl man mittlerweile bei den Schaltungen der adaptiven Pixel andere Wege eingeschlagen hat. Die Messungen der Quanteneffizienz brachten neue Erkenntnisse. Zum Einen wurden die Messungen von Markus Loose bestätigt was die Höhe der Quantenausbeute der unabgeschirmten Diode anbelangt. Zum Anderen wurde nachgewiesen, daß die Schicht mit Metall 2 eine größere Abschirmung hat, was aufgrund der Schichtdicken einleuchtet. Weiter konnte nachgewiesen werden, daß die Abschirmung im Wellenlängenbereich von 450 nm bis 800 nm konstant ist.

Die Messungen der adaptiven Testpixel und der spektralen Quanteneffizienz waren ein kleiner Schritt zum besseren Verständnis des 0,8 µm CMOS-Prozesses. Interessant wären Messungen der spektralen Quanteneffizienz anderer Dioden (z.B. Wanne-Substrat-Dioden, p^+-Wanne-Dioden) oder verschiedene Transistoren. Außerdem könnte man ein verbessertes Verfahren zur Synchronisation der Zeitbasis bei der Messung der spektralen Quanteneffizienz entwickeln.

Die Hauptaufgabe des Vision-Projektes liegt darin, ein portables System zur Orientierungshilfe für Sehbehinderte und Blinde zu entwickeln. Der Einsatz moderner Hard-und Softwaretechnologien, die dem ASIC-Labor zur Verfügung stehen und vor allem großes persönliches Engagement aller Beteiligten, ermöglichen eine zügige Weiterentwicklung der Single-Chip-Kamera und des taktilen Ausgabesystems. Das Konzept des Kamerachips wurde mit jedem Testchip sukzessiv verbessert, so daß Mitte 1998 die finale Single-Chip-Kamera zu erwarten ist. Auf diesem Chip wird sich ein Analogteil befinden, der die aufgenommenen Daten an einen digitalen Part weiterleitet. Die Verarbeitung dieser digital aufbereiteten Daten wird von einer komplexen Software übernommen, die sich zur Zeit noch in der Entwicklungs- und Testphase befindet. Die

Daten werden über einen Laptop, den die blinde Person mit sich trägt an das Ausgabesystem weitergeleitet. An dieses System werden sehr hohe Ansprüche gestellt. Einerseits darf die Datenflut nicht zu groß sein, da über den Tastsinn nur eine begrenzte Datenaufnahme möglich ist, andererseits muß das System plötzliche Änderungen der Umgebung präzise weiterleiten. Zur Zeit wird an einer elektromechanischen Konstruktion gearbeitet, mit deren Hilfe die blinde Person die Struktur der Umgebung mit den Fingern ertasten kann. Denkbar wäre auch eine Ausgabeeinheit in Form eines aktuatorbesetzten Bauchgürtels nach dem Vorbild der 1976 in San Francisco entwickelten Mobilitätshilfe für Blinde [3,4]. Welches Ausgabesystem letztendlich zum dauerhaften Einsatz in der Praxis kommen wird, werden die Tests mit Probanden zeigen.

Literaturverzeichnis

[1] M. Loose, *"Layout und Test eines Systems adaptiver Photorezeptoren in analoger CMOS-Technologie"*, Institut für Hochenergiephysik, Universität Heidelberg

[2] J. Schemmel, *"Design und Test einer Single-Chip Kamera mit integrierter Analog/Digital-Wandlung auf der Basis adaptiver Photorezeptoren"*, Institut für Hochenergiephysik, Universität Heidelberg

[3] Bergmann, Schaefer, *"Festkörper"*, Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 6

[4] P. Bach-y-Rita, *"A tactile vision substitution system based on sensory plasticity"*, Proceedings of The Second Conference on Visual Prosthesis, Academic Press New York and London 1971, S. 281-290

[5] C. C. Collins, *"Tactile Vision Synthesis"*, Proceedings of The Second Conference on Visual Prothesis, Academic Press New York and London 1971, S. 267-279

[6] Bergmann, Schaefer, *"Optik"*, Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 3

[7] Cadence Online Library Openbook, Analog Artist, Spectre Reference, Cadence Design Systems, San Jose

[8] Cadence Reference Manual, *"Analog Artist Simulation Environment"*, Volume 1+2, Cadence Design Systems, San Jose

[9] T. Delbrück, C. A. Mead, *"Analog VLSI phototransduction by continous, adaptive, logarithmic photoreceptor circuits"*, Computation and Neural Systems Program, California Institute of Technology, Pasadena, Memo No. 30, 1994, pp. 1-23

[10] H. G. Graf, B. Höfflinger, U. Seger, A. Siggelkow, *"Elektronisch sehen"*, Elektronik, Franzis Verlag Poing, 3 / 1995, S. 52-57

[11] P. R. Gray, R. G. Meyer, *"Analysis and design of analog integrated circuits"*, John Wiley & Sons, Inc.

[12] R. Gregorian, G. C. Temes, *"Analog MOS integrated circuits for signal processing"*, John Wiley & Sons, Inc.

[13] H. Hinsch, *"Elektronik"*, Skript zur Vorlesung im WS 1994 / 95, Institut für Angewandte Physik, Universität Heidelberg

[14] B. Jähne, *"Digitale Bildverarbeitung"*, Springer Verlag Heidelberg, Zweite Auflage 1991

[15] C. A. Mead und M. A. Mahowald, *"A silicin model of early visual processing"*, Neural Networks, Vol. 1, 1988, pp. 91-97

[16] R. A. Normann, I. Perlman, *"The effects of background illumination on the photorezeptors of red and green cones"*, J. Physiol., vol. 286, pp. 491-507, 1979

[17] Physik Instrumente Waldbronn, *"C-804/C-812 DC-Motor Controller"*, Operating Manual, Programming Reference, Product Documentation, Release 4.3, 1992

[18] Manfred Seifart, *"Analoge Schaltungen"*, 3. Auflage, ISBN 3-341-00740-7

[19] Geiger, Allen, Strader, *"VLSI Design Techniques for analog and digital circuits ", McGraw-Hill, New York, 1990*

[20] *"0.8 µm CMOS Process Parameters"*, Austrian Micro Systems, Unterpremstätten, Österreich

[21] Oriel Corporation, *"Light Sources, Monochromators & Spectrographs, Detectors & Detection Systems, Fiber Optics"*, Vol. 2, pp1-40

[22] *"Klinisches Wörterbuch“,* Prof. Dr. med. Dr. phil. Willibald Pschyrembel, de Gruyter Verlag

Bildverzeichnis

Danksagung

Herzlichen Dank allen, die zum Gelingen meiner Diplomarbeit beigetragen haben, insbesondere J. Boelsems, D. Droste, M. Keller, M. Loose, Prof. K. Meier, J. Schemmel, U. Trunk .