

Optoelektronisches Sicherheitssystem

von

Diplom-Physiker
Adrian Mahlkow
aus Berlin

von der Fakultät II - Mathematik und Naturwissenschaften
der Technischen Universität Berlin
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften
- Dr.-Ing. -

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr. W. Richter

Gutachter: Prof. Dr. H. Eichler

Gutachter: Prof. Dr. A. Ding

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 12.12.2002

Berlin 2002

D 83

Zusammenfassung der Dissertation: „Optoelektronisches Sicherheitssystem“

Die Aufgabenstellung bestand darin, ein Sicherheitssystem für die Überwachung transparenter Medien insbesondere organische und anorganische (mineralische) Glasscheiben auf Risse und Veränderungen zu entwickeln. Die Hauptanwendungsfälle sind die Detektion der Beschädigung der Scheibe für einen Durchtritt (Einbruch) und das Erkennen von Ermüdungs- oder Spannungsbrüchen in sicherheitssensiblen Bereichen (Havarieschutz).

Konzeptionell besteht das System aus einer Sende- und einer Empfängereinheit, die über die ganze Länge der zu schützenden Scheibe reichen und an diese geklebt, bzw. bei der Herstellung gerahmter Gläser an den Stirnkanten angebracht werden. Infrarote Strahlung wird in die Scheibe eingekoppelt. Durch Totalreflektion verbleibt ein sehr hoher und in geringer Entfernung von der Einkoppelstelle konstanter Anteil (über 75 %) der Strahlung in der Scheibe und kann am gegenüberliegenden Ende detektiert werden. Tritt nun eine Veränderung an der Glasscheibenoberfläche auf, verläßt ein Teil der Strahlung an der Bruchstelle durch Unterbrechung der Totalreflektion den Glaskörper; dieser Signalabfall wird detektiert und ausgewertet.

In einer theoretischen Betrachtung werden die Eigenschaften von organischen und mineralischen Gläsern dargestellt, um eine geeignete Wellenlänge und Lichtquelle identifizieren zu können. In einem Abstraktionsschritt ist dann der Vorgang des Brechens, bzw. dem Entstehen eines Mikrobruches in der Oberfläche durch einen Glasschneider in Form eines Modellbruches abgebildet und in seiner Wirkung auf die die Scheibe durchquerende Strahlung quantitativ beschrieben. Es ergibt sich für die angenommenen, realistischen Parameter eine Reduktion des Detektorsignales um 0,24 % pro Zentimeter Kratzerlänge der primär eingestrahlen Strahlung. Um dieses Nutzsignal sicher vom Untergrund und anderen Störeinflüssen diskriminieren zu können, ist eine aufwendige Elektronik unabdingbar, deren Beschreibung und Charakterisierung ein gesondertes Kapitel einnimmt.

Die Strahlungsquelle wird durch eine zeilenförmige Anordnung (Lichtschiene) von IREDs über die Länge der Breite der zu sichernden Scheibe gebildet. Die Emissionswellenlänge beträgt für alle Glassorten aus beschriebenen Gründen 850 nm. Detektorseitig wird eine ebenfalls zeilenförmige Anordnung von Photodioden in Parallelschaltung gewählt. Zusätzlich zum optischen Weg durch die Glasscheibe wird eine Referenzleitung aus einer Kunststofffaser gelegt. Der Kern der Auswertung ist eine elektronische Schaltung, in der nach zwei unabhängigen Frequenzfiltern für das Nutzsignal und die Referenz und einer patentierten Spitzenwertgleichrichtung das Differenzsignal aus beiden gebildet wird. In einer elektronischen Rückkopplung mit einer vergleichsweise sehr großen Zeitkonstante im Sekundenbereich wird das Differenzsignal permanent niveliert, so dass ausschließlich Signal mit einer Zeitdomäne im ms-Bereich relevante Signale liefern. Nach einem Schwellenschalter steht dann ein extern zu nutzender Alarmkontakt zur Verfügung.

Untersuchungen an mit dem System ausgerüsteten Scheiben haben neben dem zufriedenstellenden Funktionieren in Grenzen eine quantitative Übereinstimmung zwischen den zuvor angestellten Abschätzungen zur Größe des Nutzsignals und der real gemessenen Intensitäten gezeigt. Mit den Umständen angepaßten Schwellen läßt sich das System verschiedenen Umgebungsbedingungen anpassen.

Im Rahmen der Arbeit ist ein Produkt entwickelt worden, dass in seiner Struktur und den verwendeten Halbzeugen den Produktionsmöglichkeiten der beteiligten Firma angepaßt ist und nach einer weiteren Projektarbeit in eine halbautomatisierte Produktion mit wenigen zusätzlichen Handgriffen überführt wird. Die Zuverlässigkeit des Systems ist gegeben.

Die Forschungsarbeit wurde finanziell vom BMBF im Rahmen des Industrieförderprogrammes FUEGO unterstützt. Wesentliche Inhalte der Arbeit sind in einer Patentanmeldung unter der Nummer DE 196 54 850 offengelegt.

Optoelektronisches Sicherheitssystem

Dipl. Phys. A. Mahlkow

12. Oktober 2002

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgabenstellung	5
1.1	Problemstellung	5
1.2	Stand der bisherigen Forschung bzw. Technik	5
1.2.1	Ultraschallglasbruchmelder	5
1.2.2	Kontaktverfahren	6
1.2.3	Optische Verfahren	6
2	Theorie	7
2.1	Streuung	7
2.1.1	Grundbegriffe der Streuung	7
2.1.2	Streuung von Licht an Materie	8
2.2	Reflexion	10
2.2.1	Vorbemerkung	10
2.2.2	Beschreibung der Reflexion	10
2.2.3	Totalreflexion	11
2.3	Streuung im Alltag	13
2.4	Glas	14
2.4.1	Einführung	14
2.4.2	Innerer Aufbau von Glas	14
2.4.3	Fensterglas	14
2.5	Streuung zur Detektion von Rissen in Glas	18
2.5.1	Modell der Oberflächenverletzung	19
2.5.2	Streuung am Bruch	20
3	Messplatz	23
3.1	Messrechner	23
3.2	Schnittstellen	23
3.3	Netzgerät	25
3.4	Multimeter	27
3.5	Frequenzgenerator	28
3.6	Digitaloszilloskop HP350SX	31
3.7	Thermoschrank	31

4	Lichtschiene	33
4.1	Basismaterial für die Lichtschienen	33
4.2	Sendeschiene	34
4.3	Empfängerschiene	39
4.4	Glaskörper	40
4.5	Kleber	41
4.6	Thermische Eigenschaften	46
5	Elektronik	51
5.1	Gesamtübersicht	51
5.2	Bandpaßverstärker	53
5.3	Komparator	55
5.4	Alarmgeber	56
5.5	Gesamtempfängerschaltung	58
5.6	Frequenzgenerator	62
5.7	Pulsformer	64
5.8	Gesamtsenderschaltung	65
6	Zusammenfassung	67
6.1	Zielsetzung	67
6.2	Umsetzung der Ergebnisse	67
6.3	Wissenschaftliche Ergebnisse	68
6.4	Wirtschaftliche Bedeutung	69
6.4.1	Schilderung der aktuellen Marktlage	69
6.4.2	Produktkalkulation	70
6.4.3	Umsatzkalkulation	70
A	Tabellen und Listen	87
A.1	Auflistungen von Klebstoffdaten	87
A.2	Elektrische Auflistungen	87
B	Komponenten	89
B.1	Schaltungsrealisationen	89
B.2	Digital-Multimeter	90
B.3	Meßkopf	90
C	Software	93
C.1	Frequenzgenerator	93

Kapitel 1

Aufgabenstellung

1.1 Problemstellung

Das wissenschaftliche Problem besteht in der Entwicklung einer Glasscheibensicherung auf der Basis eines prinzipiell neuen Wirkprinzips, die sich durch extrem hohe Empfindlichkeit, geringen Stromverbrauch, geringe Störanfälligkeit und durch leichte Nachrüstbarkeit an allen Scheiben (organische und anorganische Gläser) auszeichnet. Verwendet werden Profilleisten, in die Leiterplattenstreifen, mit im Infraroten emittierenden SMD-LEDs bestückt, eingebracht sind. Über eine Glasschiene mit prismatischem Querschnitt angeklebt, wird Licht in eine Scheibe eingekoppelt. Für optimalen Schutz wird die Länge der Schiene der Breite des Fensters folgen; kann jedoch im Bedarfsfall schmaler sein. Das eingekoppelte Licht kann infolge von Totalreflexion an den Innenflächen die Scheibe nicht verlassen und kann so an der der Einkopplung gegenüberliegenden Seite durch eine Detektorleiste, die ebenfalls über eine prismatische Glasschiene an die Glasscheibe angeklebt ist, detektiert werden. Durch Vergleich dieses Signals mit dem emittierten Signal über eine Referenzleitung kann eine Elektronik entscheiden, ob Alarm auszulösen ist.

1.2 Stand der bisherigen Forschung bzw. Technik

Um den Durchtritt durch die Außenhaut zu melden, stehen einige auf unterschiedlichen physikalischen Eigenschaften des Glases beruhende, moderne Verfahren zur Verfügung, die durch umfangreiche Recherchen der Patent- und Offenlegungsschriften des Europäischen Patentamts^[24] und zahlreichen Besuchen auf Messen und bei Herstellerfirmen ausführlich analysiert wurden^[50].

1.2.1 Ultraschallglasbruchmelder

Bei diesen Meldern wird ausgenutzt, dass brechendes Glas und Glasscherben, die auf den Boden fallen, ganz charakteristische Schwingungen mit Frequenzen im Bereich zwischen 100 kHz und 1 MHz^[34] aussenden. Über ein Piezo-Ultraschallmikrophon können diese detektiert, anschließend verstärkt und gefiltert und auf einen Alarm hin analysiert werden. Problematisch ist, dass bei weichem Untergrund (z.B. Teppichböden) diese Frequenzen unter Umständen sehr stark gedämpft werden können und dann kein Alarm ausgelöst wird^[44]. Wird eine Frequenz verwendet, die beim Brechen der Glasfläche entsteht, so ist der Alarm sicherer. Allerdings ändert sich diese Frequenz mit der Dicke der Scheibe, Temperatur oder Feuchtigkeit^[27].

Mechanische Beanspruchung, z.B. durch Berührung oder Anlehnen an die Scheibe, kann Glas diese Ultraschallfrequenzen aussenden lassen und Brechen vortäuschen. Es kommt zum Fehlalarm^[35]. Für eine noch größere Sicherheit, beziehungsweise geringere Fehlalarmrate kann dieses System auch aktiv arbeiten. Dazu wird zusätzlich zu dem Empfänger-Modul ein Sender mit einem Piezo-Schallgeber auf die Scheibe aufgebracht. Dieser sendet in regelmäßigen Abständen ein Ultraschallpuls aus, der vom Empfänger (nach einer externen Synchronisation) detektiert werden kann^[34]. Fällt dieses Signal aus und wird gleichzeitig ein Bruch- oder Klirrsignal empfangen, so wird Alarm gegeben. Dieses Verfahren reduziert aber lediglich die Fehlalarme, erhöht nicht die Zuverlässigkeit.

1.2.2 Kontaktverfahren

In die zu sichernde Scheibe wird bereits bei der Herstellung des Glases ein Drahtgeflecht mit eingegossen. Dieses wird durch eine Elektronik permanent auf eine Veränderung des Gesamtwiderstands hin überprüft. Geht die Scheibe zu Bruch oder wird beschädigt, so werden Teile dieses Drahtgeflechtes unterbrochen, der Widerstand steigt an und es wird Alarm ausgelöst^[50]. Nachteilig sind die hohen Kosten. Die Scheiben sind konfektioniert oder teure Auftragsarbeit; ein Nachrüsten mit dieser Technik ist ausgeschlossen. Durch geschicktes Bohren durch die Scheibe wird kein Alarm ausgelöst. Es lassen sich kleine Löcher, z. B. zum Durchführen einer Drahtkonstruktion zum Öffnen der Verriegelung nicht detektieren, wenn nicht genau ein Draht getroffen wird.

1.2.3 Optische Verfahren

In die Glasfläche wird an einer Flächenkante über eine Laser-Diode Infrarotlicht eingekoppelt. Die Scheibenkanten sind rundum reflektierend beschichtet, so dass das Licht die Scheibe nicht verlässt. An einer anderen Stelle kann ein Detektor das Signal aufnehmen. Verringert sich das Signal oder bleibt ganz aus, ist die Scheibe teilweise oder vollständig zerstört und es wird Alarm gegeben. Nachteilig bei diesem (dem neuen Verfahren vom physikalischen Hintergrund am ähnlichsten) Verfahren ist, dass ein hoher Justieraufwand besteht. Das Licht des Lasers muss den Detektor direkt oder über einige Reflexionen an den zu verspiegelnden Glaskanten erreichen. Die mechanische Stabilität ist ein wichtiger Punkt: Erschütterungen stören erheblich. Eine Nachrüstung ist nicht möglich.

Ein, dem in dieser Arbeit von den verwendeten Medien am ähnlichsten, Verfahren verwendet ebenfalls Leuchtdiodenzeilen und Empfängerzeilen, die sich jedoch vor der Scheibe gegenüberstehen und eine Art „Lichtvorhang“ bilden^[56]. Wird dieser Vorhang durch ein sich der Scheibe näherndes Objekt unterbrochen, so kann ab einer gewissen Schwelle Alarm ausgelöst werden. Bei diesem Verfahren ist aber nicht sichergestellt, ob die Scheibe überhaupt beschädigt wurde, ein Anlehnen an die Scheibe löst bereits Alarm aus. Zum anderen existiert eine untere Grenze für die Größe der erkennbaren Objekte. Ist diese zu klein gewählt, wird jede Fliege, die sich auf der Scheibe niederlassen möchte, einen Alarm provozieren. Für Außenscheiben ist diese Verfahren ungeeignet, da Sender- und Empfängereinheit vor der Scheibe angebracht werden müssen und damit jedem Zugriff durch z. B. Umwelteinflüsse ausgesetzt sind.

Kapitel 2

Theorie

2.1 Streuung

Mit dem Begriff der Streuung werden in den unterschiedlichen Teilgebieten der Physik vielfältige Phänomene beschrieben. Als allgemeine Definition könnte man formulieren, dass durch Streuung die Intensität einer (korpuskularen oder wellenartigen) Strahlung in der ursprünglichen Richtung durch Wechselwirkung mit einem (wie auch immer gearteten) Medium verringert wird. Der sehr allgemeine Charakter der Streuung wird durch verschiedene Begriffspaare präzisiert:

2.1.1 Grundbegriffe der Streuung

Einfach- und Mehrfachstreuung

Betrachtet man die gestreute Strahlung im korpuskularen Bild und repräsentiert das Streumedium ebenfalls diskret, d. h. die Streuung findet an so genannten Streuzentren statt, so kann man bei einem einmaligen Wechselwirkungsakt der einfallenden Korpuskel mit diesen Zentren von Einfachstreuung sprechen^[3]. Liegen die Streuzentren besonders dicht, beziehungsweise ist der Weg der Strahlungsteilchen durch das Medium lang, so wird es sicherlich auch zu wiederholter Wechselwirkung der gestreuten Strahlung mit anderen Zentren kommen, dann liegt Mehrfachstreuung vor. Im Wellenbild lässt sich die Einfachstreuung als eine vom Streuzentrum ausgehende, durch die einfallende Welle angeregte Kugelwelle beschreiben. Abhängig von der Struktur des Streuzentrums kann diese eine richtungsabhängige Amplitude aufweisen. Für das Bild der Mehrfachstreuung lässt sich jede durch Streuung ausgehende Kugelwelle als Primäranregungswelle für ein weiteres Streuzentrum verstehen. Die Wahrscheinlichkeit einer Wechselwirkung gibt der so genannte Streuquerschnitt^[72] an, der sich anschaulich als die effektive Fläche des Streuzentrums, die vom einfallenden Korpuskel getroffen werden muss, interpretieren lässt^[71]. Er ist abhängig von der Art, Energie und Intensität der einfallenden Strahlung, wird in der Einheit 1 cm^2 bzw. in $1 \text{ barn} = 1 \cdot 10^{-24} \text{ cm}^2$ angegeben und umfasst viele Größenordnungen von z. B. einigen 10^{10} barn für die Streuung geeigneter Laserstrahlung an einem in einer Falle gespeichertem Einzelion^[52] bis hin zu wenigen 10^{-44} barn für die Streuung von 1 MeV^1 -Neutrinos an Eisen^[64].

¹ $eV = 1,60217733 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Elastische und Inelastische Streuung

Die Unterscheidung zwischen elastisch und inelastisch entscheidet sich sehr einfach an der Tatsache, ob die einfallende Strahlung beim Streuprozess Energie verliert oder nicht. Wenn nur eine Ablenkung nach der Streuung zu verzeichnen ist, spricht man von elastischer, sonst von inelastischer Streuung. Im letzteren Fall wird in der Regel die Energie auf das Streuobjekt übertragen bzw. bei makroskopischen Objekten als Wärme umgesetzt beobachtbar. Als ein klassisches Modell für elastische Streuvorgänge können idealisierte Stöße zwischen Billardkugeln angesehen werden.

Kohärente und inkohärente Streuung

Die Teile eines Strahlungsfeldes haben bei einer ungestörten, d. h. ungestreuten Ausbreitung eine feste Phasenbeziehung zueinander. Dies macht Interferenz möglich. Wenn bei einem Streuprozess diese Phasenbeziehung, also die Fähigkeit zur Interferenz erhalten bleibt, so spricht man von kohärenter Streuung, anderenfalls von inkohärenter. Aus der Definition wird z. B. erkennbar, dass die inelastische Streuung auch immer inkohärent sein muss, denn wenn ein Teil der Strahlung Energie verliert, also beim Beispiel der elektromagnetischen Strahlung seine Wellenlänge erhöht, so ist eine Interferenz nicht mehr möglich. Die bei der Beleuchtung von normalen Oberflächen mit einem Laser auftretenden so genannten Speckles sind ein Beispiel für elastische und kohärente Streuung. Die gestreuten Teilwellen interferieren nach der Streuung an Oberflächenrauigkeiten miteinander zu komplizierten Mustern.



Logo der EXPO2000

2.1.2 Streuung von Licht an Materie

Bei der Beschreibung der Streuung im Bereich der elektromagnetischen Strahlung mit Materie haben sich viele große Physiker mit ihrem Namen in den Lehrbüchern verewigt. Im folgenden sind nur die Streuphänomene ausführlicher dargestellt, die in einem Bezug zu dieser Arbeit stehen.

Rayleigh-Streuung



J. William Rayleigh

Die von Lord Rayleigh gegen Ende des 19. Jahrhunderts beschriebene Streuung beschreibt die Wechselwirkung elektromagnetischer Strahlung im sichtbaren Spektralbereich mit Streuteilchen, deren geometrische Ausdehnung klein im Vergleich zur Wellenlänge des Lichts ist. Die Beschreibung nimmt eine elastische Streuung an und fasst den Streukörper (etwa Moleküle in der Luft) als einen Hertzchen Oszillator auf, der durch die einfallende Strahlung angeregt wird und das Licht entsprechend der Charakteristik eines Hertzchen Dipols wieder abstrahlt. Die Intensität des gestreuten Lichts ist stark von der Wellenlänge des eingestrahlten Lichts abhängig, bei einer Antiproportionalität zur vierten Potenz der Wellenlänge wird kurzwelliges Licht sehr viel stärker gestreut, als langwelliges. Das Himmelsblau lässt sich mit der Rayleigh-Streuung erklären. Die Charakteristik eines Hertzchen Dipols als Erzeuger der Sekundärstrahlung — des gestreuten Lichts — prägt dem Himmelsblau zudem noch eine vom Stand der Sonne abhängige lineare Polarisierung auf, in Blickrichtung senkrecht zu den Sonnenstrahlen findet sich der größte Grad der Polarisierung. Insekten können sich anhand dieses Musters orientieren^{[6][7]}. Die unter dem Winkel φ gestreute Intensität σ lässt sich durch die

so genannte Rayleighsche Streufunktion beschreiben:

$$\sigma(\lambda) = \frac{2\pi^2}{N\lambda^4} (n^2 - 1)^2 \left(\underbrace{1}_{i_1} + \underbrace{\cos^2\varphi}_{i_2} \right) \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} \lambda \quad : \text{Wellenlänge} \\ n = n(\lambda) : \text{Brechungsindex} \\ N \quad : \text{Teilchendichte} \\ i_x \quad : \text{Polarisationsanteile} \end{array} \quad (2.1)$$

Mie-Streuung

Mie hat die Streuung für den Fall berechnet, dass die Streuteilchen in der Größenordnung der Wellenlänge der primär einfallenden, im wesentlichen sichtbaren Strahlung liegen. Relevant ist dieser Fall für viele atmosphärische Phänomene, bei denen Nebeltröpfchen oder Dunstteilchen auftreten. Es zeigt sich, dass die Streuung immer stärker in Vorwärtsrichtung erfolgt, wenn die Teilchen größer werden. Die Intensitätsverteilung über dem Streuwinkel wird immer keulenförmiger. Die untenstehende Abbildung zeigt diese Verteilung für drei verschieden große Streuteilchen. Beim ganz linken Fall mit verschwindendem Radius des Streuers geht die Mie-Streuung in die Rayleigh-Streuung über. Mit zunehmendem Radius wird der in Vorwärtsrichtung gestreute Anteil stärker. Die Berechnungen von 1908 durch Mie gelten streng nur für sphärische und in einer theoretischen Erweiterung für zylindrische Streuobjekte.



G. A. Ludwig Mie



Abbildung 2.1: Sphärische Streuteilchen mit Radius $\approx 0, 60 \text{ nm}, 90 \text{ nm}$.^[60]

Weitere, nach großen Physikern benannte Streuphänomene sind:

- Bragg-Streuung: Streuung der einfallenden Strahlung an den periodisch angeordneten Atomen des Gitters, wobei die einzelnen Sekundärstrahlungsfelder kohärent zueinander sind und daher miteinander interferieren.
- Delbrück-Streuung: Kohärente elastische Streuung von elektromagnetischer Strahlung im Potentialfeld eines Atomkerns.^[21]
- Compton-Streuung: Inelastische Streuung von Photonen an geladenen Elementarteilchen, insbesondere die Streuung an freien Elektronen.
- Brillouin-Streuung: Inelastische Streuung von elektromagnetischer Strahlung, zumeist Licht des sichtbaren und des angrenzenden infraroten Bereichs an Phononen.^[11]
- Tyndall-Streuung: Lichtstreuung in kolloidalen Lösungen und in der Luft. Von Tyndall beobachtet und von Lord Rayleigh theoretisch beschrieben. Daher wird die Tyndall-Streuung öfter als Rayleigh-Streuung (siehe 2.1.2) bezeichnet.
- Raman-Streuung: Inelastische Streuung von Licht an Materie, bei der Energie zwischen der einfallenden Strahlung und der Streumaterie ausgetauscht wird. Es werden Linien mit höherer und niedrigerer Energie, als die einfallende Strahlung beobachtet (Stokes- und Antistokeslinien^[73]).
- Thomson-Streuung: Elastische Streuung von Photonen hoher Frequenz (weiche Röntgenstrahlung) an quasifreien Elektronen.

2.2 Reflexion

2.2.1 Vorbemerkung

Nach der Vorstellung der vielen Streu-Phänomene sollen nun die Reflexion als Wechselwirkungen von Licht mit Materie beschrieben werden, bei denen die Informationen über die einfallenden Wellen nicht verloren gehen. Die Reflexion von Licht an Materie könnte also als eine kohärente und elastische Streuung beschrieben werden. Um die Darstellung zu vereinfachen, werden die Phänomene auf das Bild der geometrischen Optik beschränkt, in der eine elektromagnetische Welle als ein Strahl, eine Linie im geometrischen Sinne, reduziert wird, der sich gemäß seiner Definition geradlinig durch den Raum bewegt und beliebig zurückverfolgbar ist. Parallele Strahlen kreuzen sich erst im Unendlichen und durchdringen sich wechselwirkungsfrei. Bei den geringen Intensitäten und großen Abmessungen, die in dieser Arbeit auftreten, ist dies eine sicher zulässige Vereinfachung. Des Weiteren spielt die Polarisierung in dieser Arbeit keine Rolle, so dass ihre im Allgemeinen wichtige Rolle hier ebenfalls nicht detailliert behandelt wird. Die Wechselwirkung findet immer an einer Grenzfläche zwischen zwei Medien mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften statt. Das kann der un stetige Übergang von Luft oder Vakuum zu Glas oder Wasser sein oder die Begrenzungsfläche zwischen zwei Festkörpern oder Flüssigkeiten mit unterschiedlichen optischen Eigenschaften.

2.2.2 Beschreibung der Reflexion

Trifft ein Lichtstrahl auf eine Grenzfläche zwischen zwei optischen Medien, so wird er in der Regel aufgespalten. Beide Teile ändern ihre Ausbreitungsrichtung un stetig. Ein Teil des Lichtstrahles läuft wieder zurück in das Ursprungsmedium (M1); er wird reflektiert. Der restliche Teil dringt in das andere Medium (M2) ein; dieser Teil wird gebrochen. Das Verhältnis zwischen reflektiertem und gebrochenem Teilstrahl hängt von den optischen Eigenschaften der beteiligten Materie und dem Winkel des Strahls zur Oberfläche ab². Die optischen Eigenschaften lassen sich durch den komplexwertigen Brechungsindex als eine Funktion von der Wellenlänge beschreiben; diese Funktion nennt man auch Dispersionsrelation^[5]:

$$n^*(\lambda) = n(\lambda) + i\chi(\lambda) = \sqrt{\varepsilon_r(\lambda)\mu_r(\lambda)} \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} \chi : \text{Absorptionskoeffizienten} \\ \varepsilon_r : \text{Dielektrizitätszahl} \\ \mu_r : \text{Permeabilitätszahl} \end{array} \quad (2.2)$$

Die beiden materialspezifischen Kennzahlen der Dielektrizität (ε_r) und der Permeabilität (μ_r) lassen sich auf die mikroskopische Zusammensetzung und der Anordnung der Konstituenten der Materie zurückführen und im Prinzip berechnen. Die Messung der Brechungsindexfunktion lässt Rückschlüsse auf den inneren Aufbau der Materie zu. Für den reflektierten Teilstrahl gilt die einfache Beziehung, dass der Einfallswinkel α gleich dem Ausfallswinkel α' ist ($\alpha = \alpha'$). Der Einfallswinkel (Ausfalls- oder Reflexionswinkel) ist der Winkel zwischen einem Lot auf der Oberfläche und dem einfallenden (auslaufenden, reflektierten) Strahl; beide Strahlen liegen in einer zur Oberfläche senkrechten Ebene. Der gebrochene Teilstrahl wird ebenfalls am Auftreffpunkt in seiner Richtung und damit im Winkel zum Lot un stetig verändert. Diese Änderung ist abhängig vom Realteil der Brechungsindexfunktion (n) für die beiden aneinander grenzenden optischen Medien. Für den Zusammenhang zwischen

²Zudem tritt noch eine Polarisierung der beiden Anteile auf, dies soll hier aber nicht weiter behandelt werden.

dem Einfallswinkel und dem Brechungswinkel (β) gilt das von Snellius um 1620³ aufgestellte Brechungsgesetz⁴:

$$\frac{\sin(\alpha)}{\sin(\beta)} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c_1}{c_2} \quad (2.3)$$

Der Index n_1 (n_2) bezeichnet die Größen im Medium M1 (M2), c_i ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Strahlen in dem entsprechenden Medium (hier also die Lichtgeschwindigkeit). Das Snelliussche Brechungsgesetz gilt universell für sich ausbreitende Wellen, auch z. B. in der Akustik. Das Medium mit dem höheren Wert für den Brechungsindex nennt man *optisch dichteres* Medium, das andere *optisch dünneres*. Im dichteren Medium laufen die Lichtstrahlen mit einer geringeren Geschwindigkeit und zum Lot hin gebrochen. Die Abbildung 2.2 zeigt die Verhältnisse noch einmal zusammengefasst.



van Roijen Snellius

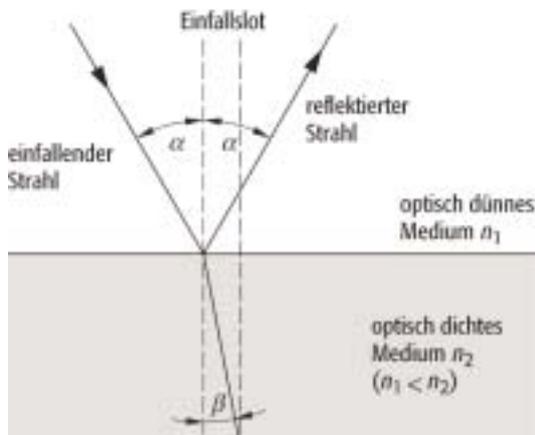


Abbildung 2.2: Die Skizze zeigt die Brechung und Reflexion eines geometrischen Lichtstrahls an einer Platte eines optisch dichteren Mediums in einem dünneren. Die Reflexion, die an der zweiten Grenzfläche auftritt, wurde aus Übersichtsgründen weggelassen; tritt aber normalerweise auf.

2.2.3 Totalreflexion

Kommt der einfallende Strahl aus dem optisch dichteren Medium, wird ein Teil des Strahls an der Grenzfläche reflektiert und läuft weiter im optisch dichteren Medium. In der Regel ist dieser Anteil kleiner als der gebrochene Teilstrahl. Da der austretende Strahl vom Lot weg gebrochen wird, kann man sich einen Einfallswinkel vorstellen, bei dem der gebrochene Strahl exakt auf der Grenzfläche propagieren würde. Dieser Winkel heißt Grenzwinkel der Totalreflexion. Denn bei noch größeren Einfallswinkeln ergibt sich kein reeller Winkel für den gebrochenen Strahl, d. h. es existiert kein austretender Strahl mehr; der auf die Grenzfläche fallende Strahl wird vollständig, also total, reflektiert. Bei einer perfekten Grenzfläche ist diese Reflexion verlustfrei. Man nutzt diese Tatsache z. B. in der Datenübertragung mittels Licht über eine Glasfaser aus. Eine Glasfaser ist quasi ein langer Stab aus einem optisch dichten Glas, umhüllt von einem optisch dünneren Glas. Ein am Ende in das Innere eingekoppelter Lichtstrahl wird an den Grenzflächen immer wieder hin und her reflektiert, falls sein Einfallswinkel größer als der Grenzwinkel ist. So können fast verlustfrei Daten über mehrere hundert Kilometer Länge transportiert werden. Für das Materialsystem Glas und Luft mit den Brechungsindizes bei sichtbarem Licht^[74] von etwa $n_{\text{Glas}} \approx 1,5$ und $n_{\text{Luft}} = 1,0002$ ergibt sich ein Grenzwinkel aus der Gleichung 2.3 nach der Bedingung, daß der Brechungswinkel $\beta = 90^\circ$ wird zu:

$$\alpha_{\text{Grenz}} = \arcsin\left(\frac{n_{\text{Luft}}}{n_{\text{Glas}}}\right) \approx 42^\circ \quad (2.4)$$

³Verschiedene Quellen geben zwischen 1618^[45], 1620^[80] und 1621^[79] an.

⁴Bereits 1601 wurde dieser Zusammenhang in seinen Grundzügen von T. Harriot entdeckt.^[45]

Fallen Strahlen unter einem größeren Winkel zum Lot auf die Grenzfläche, so werden sie total reflektiert. Die nachfolgende Skizze zeigt exemplarisch an einigen ausgewählten Strahlen das Prinzip. Eine grafische Darstellung der einfachen Gesetzmäßigkeiten zeigt die Abbildung 2.4.

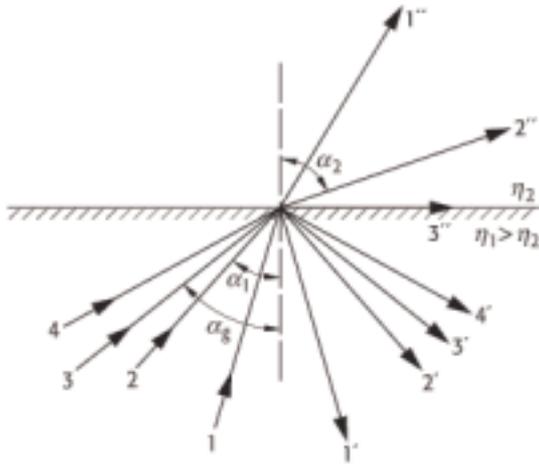


Abbildung 2.3: Die Skizze zeigt den prinzipiellen Verlauf der Teilstrahlen für einige ausgewählte Strahlen, die unter verschiedenen Winkeln in einem optisch dichteren Medium auf den gleichen Punkt treffen. Mit dem einfachen Anstrich (') sind die reflektierten, mit zweifachem Anstrich (") die gebrochenen Strahlen gekennzeichnet. Für einen bestimmten Einfallswinkel (α_g) verläuft der gebrochene Teilstrahl auf der Grenzfläche, für noch größere Winkel existieren keine austretenden Teilstrahlen; alles wird reflektiert.

Die Intensität lässt sich mithilfe der Fresnelschen Formel berechnen und ist für den reflektierten Teilstrahl mit dargestellt, unter der Annahme, dass das auftreffende Licht unpolarisiert ist, d. h. $E_{\perp} = E_{\parallel}$. Für den Gesamtreflexionsgrad r_{ges} treten die Grade für die beiden Polarisationskomponenten gleichgewichtig auf, also $r_{ges} = (r_{\perp} + r_{\parallel})/2$.

$$r_{ges} = \frac{1}{2} \left[\underbrace{\frac{\tan^2(\alpha - \beta)}{\tan^2(\alpha + \beta)}}_{r_{\parallel}} + \underbrace{\frac{\sin^2(\alpha - \beta)}{\sin^2(\alpha + \beta)}}_{r_{\perp}} \right] \quad (2.5)$$

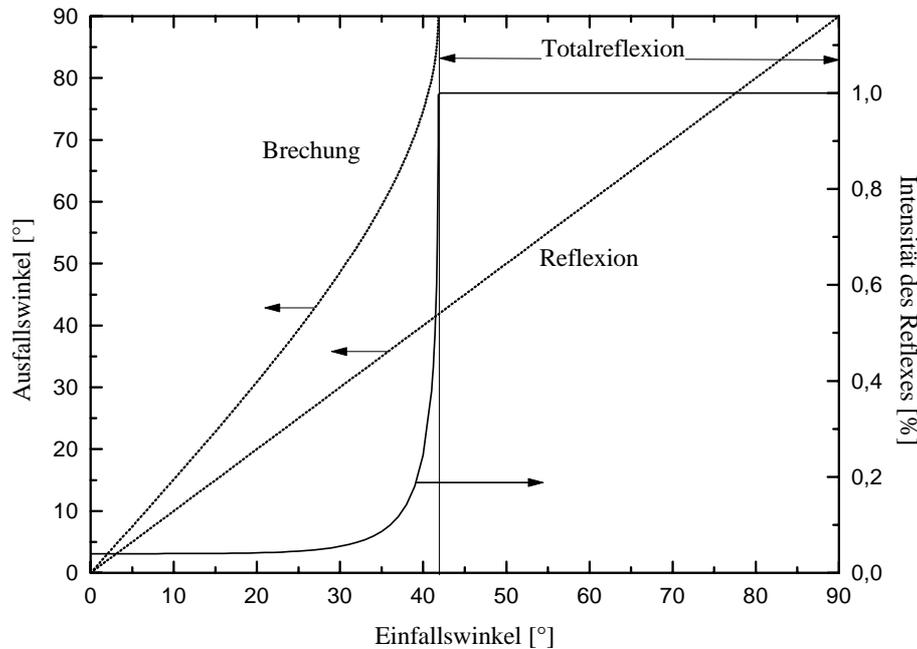


Abbildung 2.4: Es sind die resultierenden Winkel für den gebrochenen und den reflektierten Teilstrahl in Abhängigkeit vom Einfallswinkel dargestellt. Der Strahl verläuft in einem optisch dichteren Medium mit $n_2 \approx 1,5$ und trifft auf die Grenzfläche zu Luft mit $n_1 = 1,0002$. Auf der rechten Achse ist der Reflexionsgrad angegeben. Im Bereich der Totalreflexion ist dieser Anteil eins.

2.3 Streuung im Alltag

Mithilfe der zuvor vorgestellten verschiedenen Streumechanismen lassen sich nahezu alle optischen Phänomene des Alltags erklären. Für die allermeisten Beobachtungen reicht der Rückgriff auf die Rayleigh-Streuung aus; sicherlich wurde sie daher auch als Erstes beschrieben. Die anderen Streuphänomene treten meist nur bei hochenergetischer Strahlung oder bei sehr monochromatischen Lichtquellen in den Vordergrund. Vielfach sind auch sehr regelmäßige Körper notwendig, um z. B. resonante Streueffekte beobachten zu können.

Mit der Theorie der Rayleigh-Streuung lassen sich atmosphärische Phänomene, wie das Blau des Himmels oder die weiße Farbe der Wolken oder des Schnees hinreichend genau erklären. Die vielfache Streuung an ungeordneten Streuzentren lässt das Licht in alle Richtungen gleichmäßig abgestrahlt erscheinen; ohne eine Vorzugsrichtung erscheinen solche Körper diffus weiß. Auch Oberflächen, die eine unregelmäßige Rauigkeit auf Skalen von sub-Millimeter bis in den sub-Mikrometer-Bereich aufweisen, erscheinen weiß, wie z. B. das Papier auf dem diese Arbeit gedruckt wurde. Es gibt keine Vorzugsrichtung des abgestrahlten Lichts; die ursprüngliche Einfallrichtung ist durch die Mehrfachstreuung nicht mehr zu rekonstruieren. Deutlich kann man dies auch beobachten, wenn eine saubere Glasfläche, die in hohem Maße transparent erscheint und das Licht scheinbar ungehindert passieren lässt, zu einer weißen Fläche wird, wenn man eine Oberfläche aufraut. Die Transparenz wird nicht verändert, nur die zuvor vorhandene Rückverfolgbarkeit der Lichtstrahlen ist dann unmöglich.

Das Phänomen der Totalreflexion kann man wie auf Seite 11 beschrieben ausnutzen, um Daten über große Entfernungen zu übertragen. Verwendet man größere Glaskörper, so kann Licht zu Beleuchtungszwecken im Inneren geführt werden. Punktuelle Beleuchtung mit Glas- oder Kunststoff-Fibern basiert auf diesem Prinzip der Totalreflexion. Das Licht wird jeweils an parallel zueinander liegenden Grenzflächen ein- und ausgekoppelt, Streuung ist unerwünscht und sollte so weit wie möglich vermieden werden. Sollen Lichteintritts- und Austrittsfläche nicht parallel zueinander liegen, so muss das Licht im Inneren des Glaskörpers von seiner Bahn abgelenkt werden. Ein Weg dazu steht durch die Streuung zur Verfügung. Sollte der Lichtstrahl auf eine Stelle an der Grenzfläche treffen, die nicht mehr den Totalreflexionswinkel einschließt, so würde ein großer Teil des Lichtes das Glas verlassen. Ein Aufrauen an einer Stelle besteht aus einer breiten Verteilung von zufällig angeordneten Oberflächenteilstücken, die in der Regel nicht parallel zur geometrischen Oberfläche liegen. Dies stellt einen effektiven Weg dar, um in einen Glaskörper eingekoppeltes Licht austreten zu lassen. Durch eine entsprechende Anordnung solcher Streugebiete auf einer Oberfläche können z. B. Informationen beleuchtet dargestellt werden. Durch die Verwendung von sehr kleinen SMD-LEDs als Lichtquellen an den Seitenkanten von Gläsern haben sich eine Vielzahl von Produkten auf dem Markt etabliert, die auf dem Prinzip der Lichtauskopplung durch Streuung aufbauen. Die in dieser Arbeit vorgestellte Technologie benutzt ebenfalls die Streuung zur Lichtauskopplung, jedoch als Detektor für die Unverletztheit der Glasoberfläche und nicht nur zur Darstellung von Information oder zu Beleuchtungszwecken.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Sicherheitssystem soll vor allem an anorganischen Gläsern eingesetzt werden. Bevor der Wirkmechanismus, der auf Streuung beruht, theoretisch beleuchtet wird, werden daher im nächsten Abschnitt einige Grundlagen über Eigenschaften und inneren Aufbau des Materials Glas vorgestellt.

2.4 Glas

„Das Glas ist eine Frucht der wahren Feuerkunst. Das Glas kommt dem Geschlecht aller Mineralien am nechsten.“

Dr. Chr. Merret, 1756, aus ^[94]

2.4.1 Einführung

Nach werkstoffwissenschaftlichen Gesichtspunkten versteht man unter Gläsern Feststoffe, die sich im amorphen (ohne einheitliche Struktur), nichtkristallinen Zustand befinden.^{5[41]} Im Prinzip handelt es sich bei Glas um eine eingefrorene, unterkühlte Flüssigkeit oder Schmelze^[37]. Für die Optik zählt im wesentlichen die hohe Transparenz im sichtbaren und den angrenzenden Spektralbereichen. Die größte Menge der verwendeten Gläser sind anorganischer Herkunft, die so genannten mineralischen Gläser. Der Hauptbestandteil des herkömmlichen Glases ist Quarz. Je nach Anwendungsgebiet besteht Glas aus Gemischen von basischen Oxiden (wie z. B. Natrium-, Kalium-, Magnesium-, Calcium-, Barium- oder Zinkoxid) und sauren Oxiden (z. B. Siliziumdioxid, Bortrioxid, Aluminiumtrioxid oder Diphosphorpentoxid). Das Glas des reinen SiO_2 (Siliziumdioxid) wird Kiesel- oder Quarzglas genannt. Natron-Kalk-Glas setzt sich aus Natriumoxid, Calciumoxid und Siliziumdioxid, Kali-Kalk-Glas aus Kaliumoxid, Calciumoxid und Siliziumdioxid zusammen. Das natriumhaltige Glas ist das häufigste Gebrauchsglas (Fensterglas).

2.4.2 Innerer Aufbau von Glas

Die meisten Gläser enthalten als Hauptbestandteil SiO_2 (50 bis 80%) und werden daher auch allgemein als Silikatgläser bezeichnet. Im festen Zustand ist jedes Si-Atom von vier benachbarten O-Atomen umgeben, wobei die Sauerstoffatome tetraedrisch um das Si-Atom angeordnet sind. Diese $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -Tetraeder sind die Grundbausteine der Glasstruktur.

Bereits im flüssigen Zustand sind sie zu größeren Molekülverbänden zusammengeschlossen, die Viskosität der Schmelze nimmt beim Abkühlen stark zu und die Beweglichkeit der einzelnen Bausteine entsprechend ab, so dass sich kein Kristallgitter mehr ausbilden kann (siehe Abbildung 2.4.2 (Mitte)). Die $(\text{SiO}_4)^{4-}$ -Gruppen werden auch als Netzwerkbildner bezeichnet. Die kovalenten Si-O-Verbindungen haben eine hohe Bindungsenergie, daher ist auch eine sehr hohe Temperatur von 1710 °C zum Schmelzen des Glases erforderlich. Für geringere Verarbeitungstemperaturen werden deshalb Netzwerkkunterbrecher (Flussmittel) z. B. Natriumoxid zugegeben.

2.4.3 Fensterglas

Nach DIN 1249 ist Fensterglas ein planes und durchsichtiges Alkali-Kalk-Glas. Es wird aus Quarzsand, Kalk und Soda bei einer Temperatur von ca. 1500°C erschmolzen. Die Schmelze

⁵Für Glas gibt es keine einheitliche Definition:

- Glas ist ein anorganisches Schmelzprodukt, das abgekühlt ist, ohne zu kristallisieren.^[40]
- Als Glas werden alle amorphen Körper bezeichnet, die man durch Unterkühlung einer Schmelze erhält, unabhängig von ihrer chemischen Zusammensetzung und dem Temperaturbereich ihrer Verfestigung und die infolge der allmählichen Zunahme der Viskosität die mechanische Eigenschaft fester Körper annehmen. Der Übergang aus dem flüssigen in den Glaszustand muss reversibel sein.^[43]

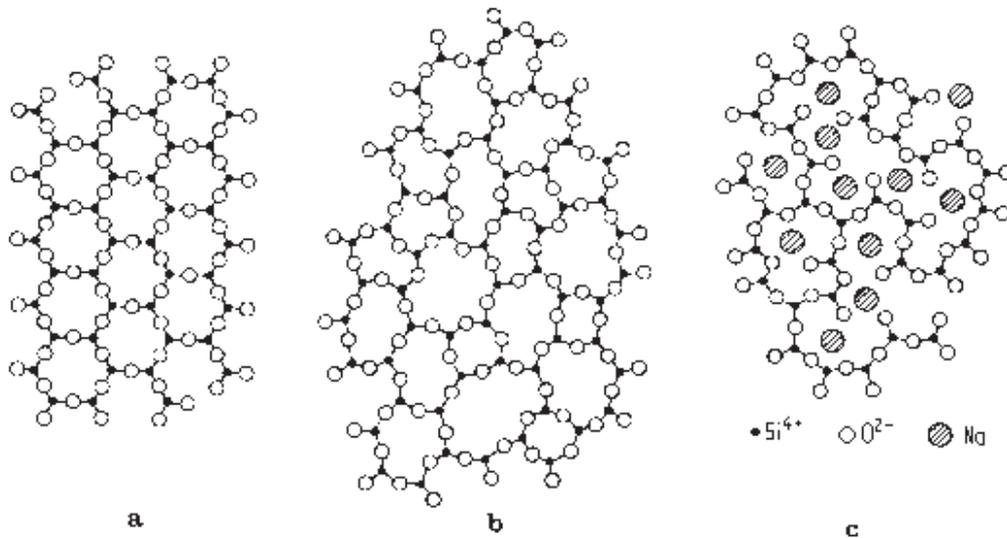


Abbildung 2.5: Die Abbildung zeigt prinzipiell den inneren Aufbau von kristallinem Quarz (links), von Quarzglas (Mitte) und Glas mit Flußmittel (rechts). Für die Herstellung von Glas muss das Kristallgitter aufgebrochen werden.

fließt (daher auch die übliche Bezeichnung Floatglas) über ein abgeschirmtes Metallband und wird so langsam abgekühlt. Das entstehende Glas hat eine Dichte von etwa $2,5 \text{ g/cm}^3$. Die Eigenschaften von Fensterglas sind nicht sehr genau bestimmt, da auch die Zusammensetzung in weiten Bereichen schwanken kann. Daher sind in der folgenden Auflistung die gefundenen Werte für Fensterglas auch Werte von AR[®]-Glas der Firma Schott (ein sehr reines Alkali-Kalk-Glas) und reinem Quarzglas gegenüber gestellt.

		Fensterglas ^[37]	AR-Glas ^[38]	Quarzglas ^[39]
Obere Kühltemperatur ¹	°C	400 ... 600	530	1075
Erweichungstemperatur ²	°C		720	1585
Verarbeitungstemperatur ³	°C	≈ 800	1040	1710
α_0 ⁴	10^{-6} K^{-1}	9 ... 10	9,1	0,48
TWB ⁵	°C	60 ... 100	300	1000
Brechungsindex ⁶	1	1,3 ... 1,6	1,514	1,45840
Dichte	g/cm^3	2,1 ... 2,6	2,50	2,202

Tabelle 2.1: In der Auflistung sind einige wichtige mechanische und thermische Eigenschaften verschiedener Glassorten gegenüber gestellt.

Verunreinigungen in den Rohstoffen trüben das Glas. Im Rohstoff Sand enthaltenes Eisen ruft eine Grün- und Braunfärbung hervor^{[37][61]}. Bis zu einem Anteil von weniger als 0,1 % Fe_2O_3 kann dies durch eine Beimischung von Mangandioxid wieder entfernt werden^[23]. Die Transparenz für elektromagnetische Strahlung reicht vom nahen UV bis weit in den infraroten

¹Die Obere Kühltemperatur ist die Temperatur, bei der die Viskosität des Glases $10^{12} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ beträgt.^[89]

²Die Erweichungstemperatur ist die Temperatur, bei der die Viskosität des Glases $10^{6,6} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ beträgt.

³Die Verarbeitungstemperatur ist die Temperatur, bei der die Viskosität des Glases $10^3 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ beträgt.

⁴Linearer Ausdehnungskoeffizient bezogen auf das Temperaturintervall zwischen -20 und 200 °C

⁵Temperaturwechselbelastung

⁶ n_d bei einer Wellenlänge von $587,6 \text{ nm}$

Spektralbereich. Die verschiedenen Beimischungen und Verunreinigungen verringern diesen Bereich erheblich und führen zu verschiedenen Einfärbungen, d. h. Absorption im sichtbaren Bereich des Lichtes. Eine kleine Auswahl der häufigsten Fremd-Ionen und der Farbeindruck in Glas zeigt die Tabelle 2.4.3.

Ion	Peak-Wellenlänge	Farbeindruck	Ion	Peak-Wellenlänge	Farbeindruck
Fe ²⁺	1060 nm	— [83]	Cr ³⁺	450 nm	Violett
Fe ²⁺	1050 nm	— [93]	Cu ²⁺	450 nm	Blau
Cu ²⁺	780 nm	Rot	Fe ³⁺	435 nm	Gelb-grün [20]
Cr ³⁺	675 nm	Grün	Fe ³⁺	420 nm	Gelb-grün [17]
Cr ³⁺	650 nm	Grün	Fe ³⁺	380 nm	Gelb [93][87]
Cr ³⁺	630 nm	Grün	Cr ⁶⁺	365 nm	Gelb
Mn ³⁺	490 nm	Violett			

Tabelle 2.2: Die Tabelle listet einige wichtige Fremd-Ionen auf, die für Verfärbungen in Alkali-Kalk-Gläsern^[4] verantwortlich sind. Die Peakwellenlänge identifiziert ein lokales Maximum der Absorptionskurven in einer Glasmatrix.

Die nachfolgende Abbildung 2.4.3 zeigt die Transparenz von sehr reinem Alkali-Kalk-Glas als idealisiertes Fensterglas im Vergleich zu Borsilikat- und Quarzglas. In dieser Grafik sind zusätzlich als waagerechte Linien die Absorptionsmaxima der verschiedenen ionischen Verfärbungen aus Tabelle 2.4.3 mit eingezeichnet. Darüber hinaus ist die für die Durchleuchtung der Fensterscheiben gewählte Wellenlänge der Lichtquellen mit λ_P eingezeichnet.

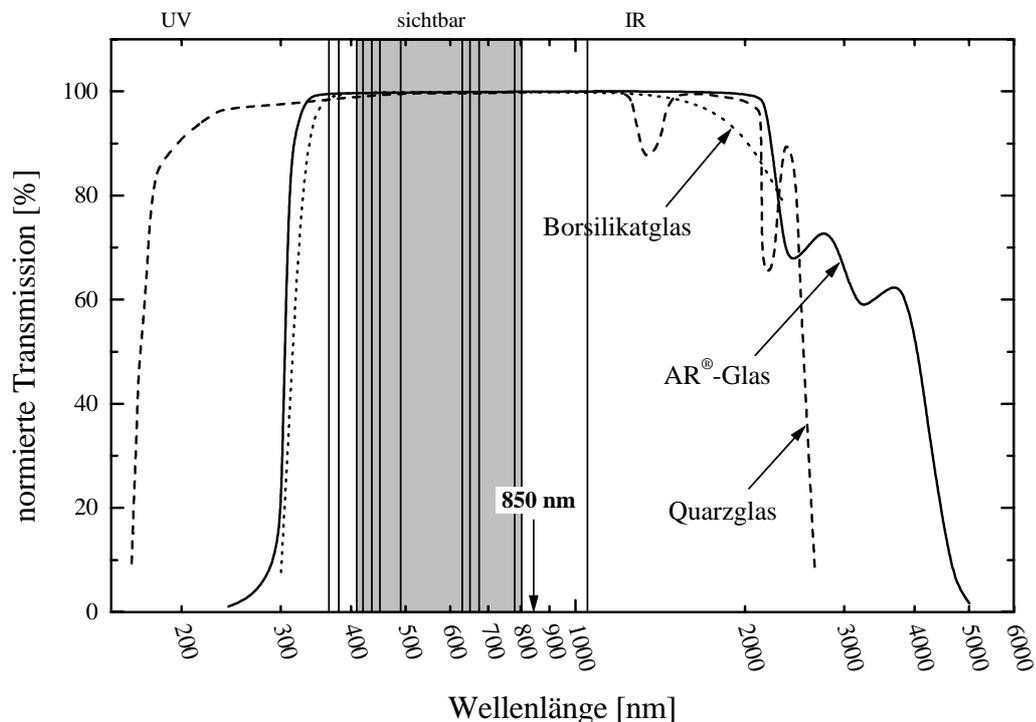


Abbildung 2.6: Die Abbildung zeigt für die drei wichtigsten Glassorten: Quarzglas, Borsilikatglas und Alkali-Kalk-Glas die spektrale Abhängigkeit der Transmission. Die Kurven sind normiert, da die Daten an verschiedenen dicken Proben ermittelt wurden. Quarzglas zeigt absolut die höchste Transmission.

In der Realität kann nicht von solchen reinen und absorptionsfreien Gläsern ausgegangen werden. Das Sicherheitssystem muss auch an Scheiben minderer Qualität, d. h. mit höheren Fremd-Ionen-Anteilen zuverlässig funktionieren. Um ein möglichst gutes Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu bekommen, sollte für die Sendeeinheit eine Wellenlänge gewählt werden, die folgende Kriterien erfüllt:

- Geringe Absorption dieses Lichts in normalen und schlechteren Gläsern.
- Hohe Empfindlichkeit eines einfachen Photoempfängers für dieses Licht.
- Nicht im sichtbaren Spektralbereich.
- Preiswerte Verfügbarkeit von LEDs im gewählten Spektralbereich.

Der vorletzte Punkt soll verhindern, dass das System beim Betrieb sofort erkannt wird, bzw. der Anwender durch Streulicht nicht gestört wird. In Verbindung mit dem letzten Punkt kommt nur noch der Spektralbereich des nahen Infrarots in Frage. Die Abbildung 2.4.3 zeigt die spektrale Abhängigkeit des linearen Absorptionskoeffizienten von Eisen(II)- und Eisen(III)-Ionen in einem Alkali-Silikat-Glas^[4]. Für die Messungen wurden Eisen-Beimischungen im Prozentbereich verwendet; dies ist um mindestens zwei Größenordnungen mehr, als in den schlechtesten Fenstergläsern^[23] zu erwarten ist.

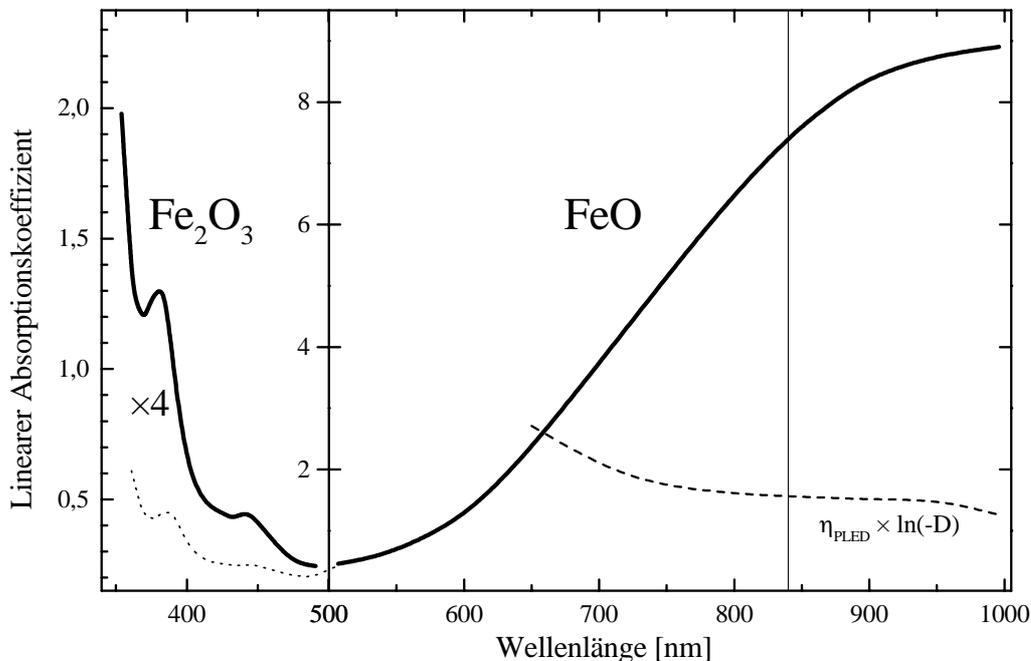


Abbildung 2.7: Die Abbildung zeigt die spektrale Abhängigkeit des linearen Absorptionskoeffizienten für ein in den Anteilen nicht näher spezifiziertes Gemisch aus Eisen(II)- und Eisen(III)-Ionen in einem Alkali-Silikat-Glas. Durch Variation bei der Herstellung kann das Verhältnis der beiden Ionen-Sorten verändert werden. Normales Fensterglas wird so hergestellt, dass der Schwerpunkt bei Eisen(II)-Ionen und damit der Absorptionsschwerpunkt im UV-Bereich liegt^[23]. Als gestrichelte Linie im IR-Bereich ist zusätzlich die mit der Transmission (optische Dichte D für reines Fensterglas) gefaltete Photodioden-Empfindlichkeit mit eingezeichnet. Die senkrechte Linie bezeichnet die für die Sendedioden gewählte Wellenlänge.

Nach Beachtung aller vorangehend angesprochenen Aspekte wurde die Wellenlänge der Sendedioden zu $\lambda_{\text{IRED}} = 840 \text{ nm}$ gewählt. Für die Verwendung des Sicherheitssystems an organischen Gläsern ist die Wahl der Wellenlänge im Infraroten weniger kritisch, da durch den Herstellungsprozess bedingt, ionische Verunreinigungen kaum eine Rolle spielen. Absorptionskurven von Acryl- und Plexiglas, PMMA und anderen, transparenten Kunststoffen zeigt die Abbildung 2.4.3.

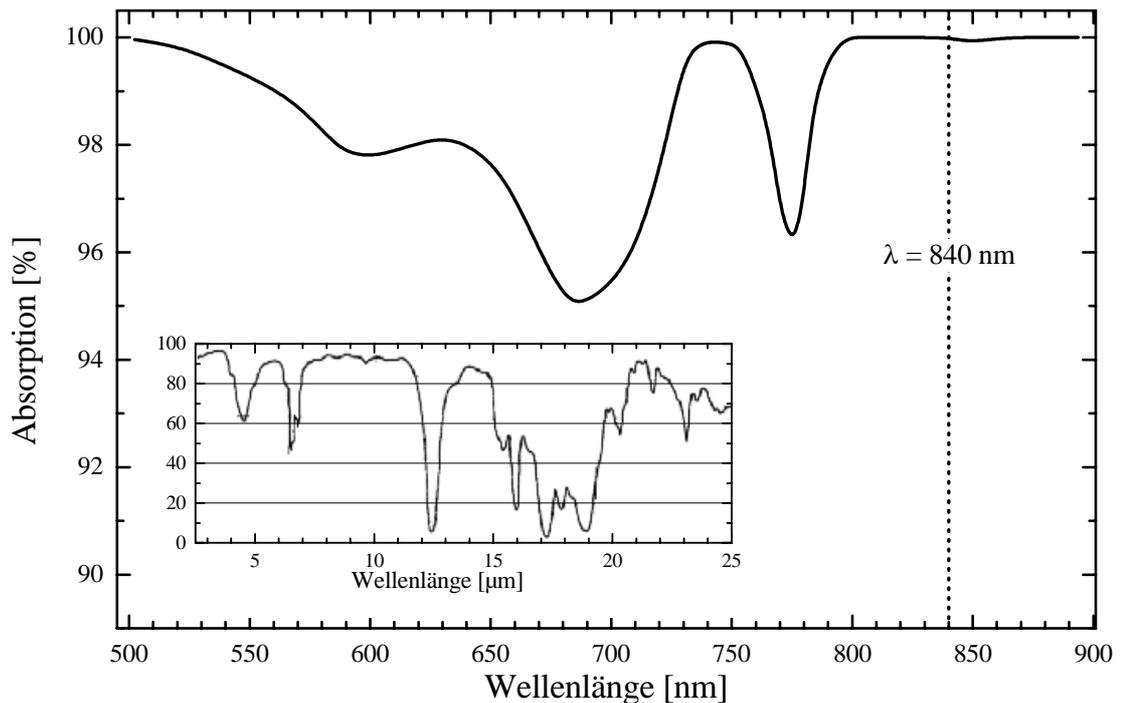


Abbildung 2.8: Die Abbildung zeigt die Absorption für hoch-transparentes PMMA (Plexiglas[®]) mit einer Schichtdicke von einem Meter. Bei der für die Sendedioden gewählten Wellenlänge von $\lambda_{\text{RED}} = 840 \text{ nm}$ zeigt sich eine sehr hohe Transmission. Die Absorptionspeaks liegen aufgrund der organischen Verbindungen des Materials im nahen Infrarot (Einsatz links unten).

Dargestellt ist die Absorption von hoch transparentem PMMA (Handelsname: Plexiglas[®]) im langwellig Sichtbaren und angrenzenden, infraroten Spektralbereich. Der kleine Einsatz zeigt die Absorption im IR-Bereich von 2,5 bis 25 μm . Man erkennt deutlich die geringe Absorption bis zu 11 μm mit zwei Absorptionspeaks. Diese Messungen sind an 1 Meter dicken Platten durchgeführt, bzw. auf solche Materialstärken umgerechnet worden. Die Absorption kann sich z. B. durch photoinduzierte Prozesse ändern. Diese spielen sich allerdings bei Intensitäten selbst stärksten Sonnenlichts auf Zeitskalen im Monate-Bereich ab^[68] und werden von der aktiven Elektronik (siehe Thema „Abgleich“ auf Seite 53) herausgeregelt. Auch in Glas sind photosensitive Prozesse bekannt. Speziell dotierte Gläser färben sich sogar relativ schnell bei UV-Bestrahlung ein: Phototrope (Brillen-)Gläser. Solche Dotierungen liegen in normalen Fenstergläsern nicht vor. Cer und Silberhalogenide bilden die aktiven Keime für diese Funktionalität. Da in normalen Gläsern nur Spuren vorhanden sind und die Zeitkonstante im Bereich von Minuten liegt^[66], wurden solche Phänomene nicht weiter betrachtet. Die photoinduzierte Degradation von Glas spielt sich auch bei großen Lichtintensitäten im UV-Bereich auf Zeitskalen mehrerer Jahre ab^[42].

2.5 Streuung zur Detektion von Rissen in Glas

Das physikalische Wirkprinzip des optoelektronischen Sicherheitssystems besteht darin, dass durch die lokale Verletzung der Oberfläche, z. B. durch Ritzen oder Bruch am Glas, durch Totalreflexion im Inneren der Scheibe geführtes Licht austritt. Diese fehlende Intensität wird als alarmrelevantes Signal aufgenommen. Im Folgenden soll die Veränderung der Glasoberfläche durch Ritzen moduliert und die austretende Lichtmenge abgeschätzt werden.

2.5.1 Modell der Oberflächenverletzung



Abbildung 2.9: Die linke, mikroskopische Aufnahme zeigt eine 10 mm dicke Glasbruchkante. Es sind in verschiedene Richtungen ins Glas laufende Mikrorisse erkennbar, z. T. bis 3 mm lang. Sie beginnen an Inertialbrüchen mit einigen zehntel Millimetern Länge, die sich im Laufe der Zeit bzw. durch weitere Druckeinwirkung vergrößern. Auf der rechten Seite ist ein durch ein stark lokalisiertes Druckereignis erzeugter Riss zu erkennen.



Das sehr harte Schneidrad oder die Spitze eines Glasschneiders lassen lokal den Druck auf der Oberfläche über die durch das Schubmodul des Glases definierte Spannungsgrenze ansteigen. Es gilt theoretisch in einer vereinfachten Herleitung^[13] über das Hookesche Gesetz^[47] für einen isotropen Körper:

$$\sigma_{theo} = \sqrt{\frac{G\gamma_0}{d}} \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} G : \text{Schubmodul} \\ \gamma_0 : \text{spezifische Oberflächenenergie} \\ d : \text{Bindungslänge} \end{array} \quad (2.6)$$

Für Glas ergibt sich mit typischen Werten eine theoretische Spannungsgrenze von:

$$\sigma_{theo} = 6,58 \text{ GPa} \quad \text{mit} \quad \begin{array}{l} G = 65,0 \text{ GPa} \quad [74] \\ \gamma_0 = 0,3 \text{ J/m}^2 \quad [14] \\ d = 4,5 \text{ \AA} \quad [19] \end{array} \quad (2.7)$$

Wenn an der Oberfläche ein initialer Riss durch das Aufbrechen von Bindungen entstanden ist (zuerst an Stellen mit geringerer Bindungsenergie, also Stör- oder Fehlstellen), so kann sich durch den weiterhin einwirkenden Druck dieser Riss leicht ins Material fortsetzen. Der hierfür benötigte Druck ist um Größenordnungen kleiner und wird als σ_a bezeichnet. Von der Oberfläche ins Volumen bilden sich Risse entlang von schwächeren Bindungen im Glasgefüge. An Korngrenzen können sich der Riss auf- oder kleinere Risse abspalten. Aus mikroskopischen Aufnahmen (siehe Abbildung 2.5.1) wurde hier mit einem stark vereinfachten Modell die Wirkung auf das durch Totalreflexion in der Scheibe laufende Licht abgeleitet:

- Der Riss erfolgt räumlich parallel zur Bewegungsrichtung des Schneidwerkzeugs. In der Realität treten immer neue Risse auf, die um die ausgezeichnete Bewegungsrichtung herum um einige Grad gedreht sein können. Diese Orientierung der Risse zueinander ist durch die Absenkung der Oberflächenenergie durch die Verspannung der vorhergehenden Risse zu erklären. Es wird von einem durchgehenden Riss der Länge l ausgegangen.
- Es gibt einen Hauptriss, der an der Oberfläche beginnend senkrecht ins Volumen vordringt; aus mikroskopischen Aufnahmen wird die Eindringtiefe zu drei zehntel Millimeter abgeschätzt.

- Am Ende dieses Hauptrisses erfolgt eine Aufspaltung in drei Nebenrisse, die in Fortsetzung und unter einem Winkel von $\pm 45^\circ$ zum Hauptriss verlaufen. Die Nebenrichtungen sind die Richtungen mit der größten Schubspannung^[15].
- Die Verspannung am Riss nimmt mit der Wurzel der Eindringtiefe ab^[16], so dass die Nebenrisse noch $\sqrt{3}$ der Länge erreichen. Die fraktale Gesamtausdehnung ergibt sich dann als Grenzwert zu etwa $1100 \mu\text{m}$ Breite und $700 \mu\text{m}$ Tiefe. Bei einer Ausgangslänge von $300 \mu\text{m}$ sind die Risse nach zehn Generationen kürzer als die Wellenlänge der verwendeten Infrarotstrahlung.

Die folgende Abbildung zeigt einen Querschnitt durch den Modellbruch nach den hier aufgeführten Annahmen:

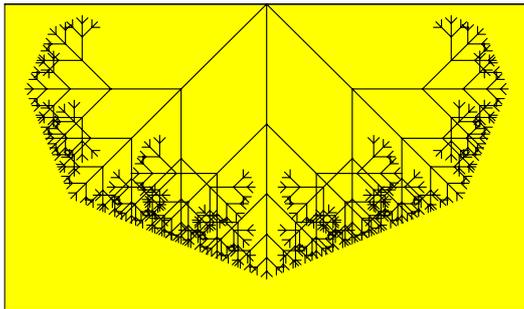


Abbildung 2.10: Dieser konstruierte Bruchverlauf entspricht den zuvor aufgeführten Annahmen. Viele Beobachtungen an realen Brüchen kann man im Prinzip erkennen. Es bildet sich eine Art Fischgrätenmuster um den Hauptbruch, der senkrecht zur Oberfläche verläuft, aus (vgl. Abbildung 2.5.1). Bei der Benutzung eines Glasschneiders kommt es zu Ausbrüchen aus der Oberfläche in Form von Glasteilchen aller Größenordnungen von der mm- bis hin zur sub- μm -Skala. Man kann erkennen, dass die abzweigenden Nebenbrüche fast wieder bis zur Oberfläche reichen und sich so Ausplatzungen erklären lassen.

2.5.2 Streuung am Bruch

Für die Ablenkung des Lichts an einer Bruchfläche aus der Scheibe heraus ist nur die Ablenkung in Bezug auf das Lot auf der Oberfläche relevant. In der Schnittebene, aufgespannt durch den einfallenden und den gebrochenen Lichtstrahl, sind die Verhältnisse für alle Auftreffwinkel in der waagerechten Ebene gleich, mit Ausnahme des Falles, in dem der Lichtstrahl genau parallel durch den Spalt, d. h. senkrecht zu unserer Schnittebene durch den Spalt verläuft. Der Bruch dringt im Modell bis etwa $700 \mu\text{m}$ in die Glasmatrix ein. Die Winkelverteilung der Bruchebenen ist bei entstehenden Ausplatzungen bzw. größeren Spalten wichtig, um abschätzen zu können, wieviel Licht an einer solchen Struktur ausgekoppelt wird. In der folgenden Abbildung ist diese Verteilung für fortschreitende Ausbreitung des Bruches in das Material hinein mit entsprechend zunehmender Anzahl von Verzweigungen dargestellt. Man erkennt, dass bereits nach der zweiten Generation die Vorzugsrichtung senkrecht zur Oberfläche stark abgenommen hat, so dass im Weiteren von einer Gleichverteilung der Lagewinkel der Bruchebenen ausgegangen wird. Für die lichtauskoppelnde Wirkung des Bruchs ist zudem noch die Verteilung der Einfallswinkel der in der Scheibe propagierenden Lichtstrahlen notwendig. Das Licht wird an den Seitenkanten der zu schützenden Scheibe eingekoppelt (siehe Kapitel 4.2) und durch Totalreflexion (siehe Kapitel 2.2.3) im Inneren geführt. Nur Lichtstrahlen, die flacher als der Grenzwinkel auf die Oberfläche treffen, verbleiben über lange Strecken, d. h. viele Reflexionen im Glas. Die Abbildung 2.12 zeigt diesen Zusammenhang für eine realistische Geometrie mit SMD-LEDs einer Wellenlänge von $\lambda \approx 840 \text{ nm}$:

Der Anteil der Strahlen, die unter größerem als dem Grenzwinkel im Glas verlaufen, nimmt nach wenigen Reflexionen an der Innenkante deutlich ab, der Anteil an Strahlen, die nahezu parallel zur Oberfläche verlaufen, wird nur sehr langsam größer, da die Einkoppelstellen mittig zwischen den Grenzflächen liegen. Auf der Oberfläche propagierende Lichtwellen werden

Abbildung 2.11: In der dreidimensionalen Darstellung ist die Verteilung der Winkel der Bruchebenen zum Lot auf die Oberfläche der Glasmatrix mit zunehmendem Bruchfortschritt dargestellt. Die Verteilungen sind jeweils für eine Verzweigungsanzahl normiert aufgetragen. Man erkennt deutlich die geringer werdende Dominanz der senkrechten primären Bruchebene mit zunehmendem Fortgang, d. h. Verzweigung des Bruchs.

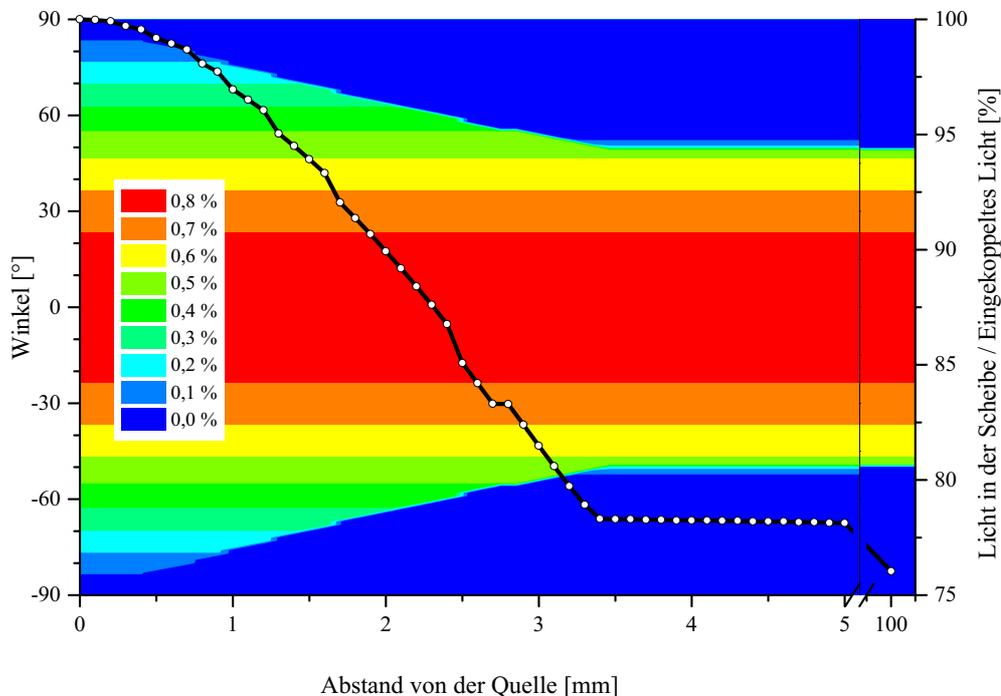
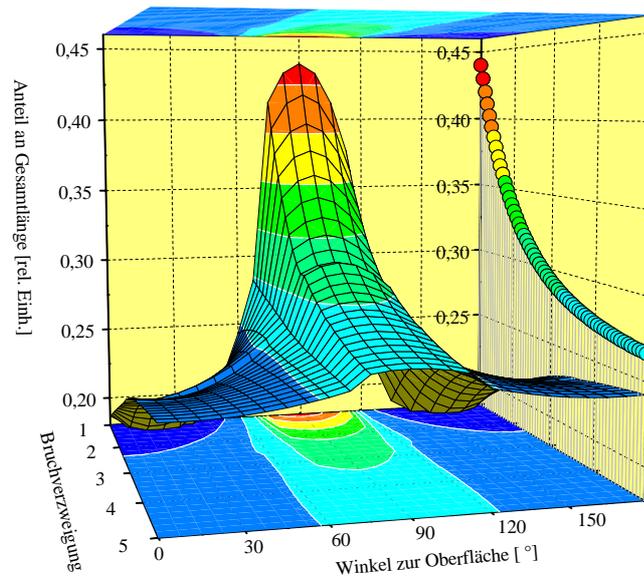


Abbildung 2.12: Die Konturgraphik zeigt den relativen, integralen Anteil an Strahlen an der Oberfläche des Glases, bzw. kurz darunter pro 1° Winkelintervall in Abhängigkeit vom Abstand von der Einkoppelstelle am linken Rand. In der Mitte ist ein Skalenwechsel in der Entfernungsschse und der Farbskala von logarithmisch für das Nahfeld zu linearer Einteilung für größere Entfernungen. Bei dieser Berechnung wurde Absorption im transparenten Körper vernachlässigt.

nicht gesondert behandelt, da es sich zum einen um ein infinitesimales Winkelintervall handelt und zum anderen die Welligkeit der Glasoberfläche (Gläser mit Welligkeit $\leq 0,5$ mm gelten als fehlerfrei^[92]) diese aus- oder Einkoppelt. Nach etwa 12 mm verlaufen hier nahezu alle Strahlen unter flacherem Winkel als dem Grenzwinkel, die Verteilung ist relativ gleichmäßig (0,9 % im Maximum bis 0,6 % für Strahlen mit Grenzwinkel). In der Regel kann man von dieser Winkelverteilung ausgehen, da die zu sichernden Scheiben deutlich größer als nur wenige Millimeter sind. Integriert man über die Verteilung, erhält man den vom eingekoppelten Licht im Glas verbleibenden Anteil, nach 60 mm etwa 70 % und etwa 75 % als asymptot-

tischen Grenzwert. Dieser Anteil verteilt sich in einiger Entfernung von der Einkoppelstelle nahezu gleichmäßig über den Querschnitt der Scheibe. In der zentralen Schicht der Scheibe ergibt sich nach wenigen Millimetern ein Integralwert von 78 % und asymptotisch 76 %. Die vom eingekoppelten Licht in der Scheibe verbleibenden etwa 76 % sind demnach relativ gleichmäßig verteilt, bei dem hier benutzten Modellglas von 8 mm Dicke also 9,5 %/mm.

Treffen solchermaßen, wie in Abbildung 2.12 dargestellte, winkelverteilte Lichtstrahlen auf einen Modellbruch (siehe Abbildung 2.10), so kann man bei einer Gleichverteilung der Lage der Bruchebenen (Abbildung 2.11 macht diese Annahme plausibel) feststellen, dass es für jede Winkellage des auftreffenden Strahls mit gleicher Wahrscheinlichkeit eine Ebene gibt, die das Licht aus dem Glaskörper austreten lässt. Integriert man den Transmissionsgrad zwischen den beiden Grenzwinkeln auf, so erhält man einen Anteil von 42 %, der am Bruch ausgekoppelt wird, der Rest wird in die Matrix zurück reflektiert. Der Bruch dringt etwa 700 μm in das Glas ein, in einer oberflächennahen Schicht dieser Dicke werden etwa 6,6 % des eingekoppelten Lichts geführt. In diesem optimal angenommenen Modell würden insgesamt 2,8 % des eingekoppelten Lichts die Scheibe verlassen. Ein kurzes Zahlenbeispiel soll die Größenordnung der zu erwartenden Effekte verdeutlichen:

Breite der Scheibe	B	=	1,0	m
Lichteinkopplung	P	=	1.500	mW
rel. Lichteinkopplung	P/B	=	15	mW/cm
Kratzerbreite	b	=	1,0	cm
Auskoppelstärke	v	=	2,8	%
Gesamtverlust	V	=	0,42	mW

$$V = v \cdot b \cdot \frac{P}{B} = 0,42 \text{ mW} \quad (2.8)$$

Die Sammelfläche auf der Detektorseite beträgt pro SMD-Empfänger-Diode 1 mm² und 100 Empfänger pro Meter Scheibenbreite. Vom durchtretenden Licht wird bei der 8 mm dicken Modellscheibe 1,25 % des Lichtes mit einer Empfindlichkeit von 460 mA/W detektiert und einen Photostrom von 1.500 mW · 76 % · 1,25 % · 460 mA/W = 6,6 mA erzeugen. Bei der geplanten Differenzbildung würde in der Messelektronik dieser konstante Anteil eliminiert und nur die Änderung durch den Kratzer gemessen werden. Dieser Photostrom liegt in der Größenordnung von 2 $\mu\text{A}/\text{cm}$ und damit um mindestens drei Größenordnungen über den üblichen Leckströmen von einigen nA von normalen Operationsverstärker.

Diese theoretische Abschätzung hat gezeigt, dass es möglich sein sollte, Kratzer von einigen Millimetern Länge auf einer großen Scheibe zu detektieren und damit die Aufgabenstellung zu erfüllen. Diese Abschätzung gilt auch für Verbundglasscheiben, da sich die Verletzungen der Oberfläche komplett in der äußeren Glasscheibe des Komposites befindet und der Verbund als einheitlicher optischer Körper gelten kann. Die Kunststoff- bzw. Kunstharz-Verbundschichten sind im Brechungsindex den Gläsern angepasst^[90], es können im Einzelfall und bei vielen Lagen leichte Einfärbungen auftreten^[91]. Diese sind allerdings zeitlich konstant bzw. bleichen mit Zeitkonstanten im Bereich Jahre aus.

Kapitel 3

Messplatz

3.1 Messrechner

Für die Aufnahme und Protokollierung von Messwerten steht ein einfacher PC (486DX mit 50 MHz) mit 400 MB Festplatte zur Verfügung. Das Betriebssystem ist „Windows 3.11 for Workgroups“, als Oberfläche wurde das Dashboard für HP-Workstation und folgende, für die Arbeit relevante Software installiert:

TurboPascal [®] 7.0	(Programmiersprache für Windows)
C++	(Compiler für Borland C++)
Origin TM 4.1	(Graphische Darstellung und Auswertung von Daten)
Digiscope 2.0	(Kommunikationsprogramm zum Multimeter 3850D)
Eagle [®] 3.55	(Leiterplattenlayout mit Autorouting-Funktion)
Excel [®] 5.0	(Tabellenkalkulationsprogramm)

3.2 Schnittstellen

Der Rechner ist mit einer MultiLAB /2-Schnittstellenkarte der Firma SORCUS Heidelberg ausgerüstet. Sie verfügt über verschiedene analoge Ein- und Ausgänge, die zur Ansteuerung notwendigen Routinen sind als Units für PASCAL und als Header für C++ vorhanden und implementiert. Über folgende Eigenschaften verfügt die Karte:

- Zwei Analogausgänge, 0 ... 10 V oder -10 V ... 10 V, bzw. im Strombetrieb Ströme von 0 ... 20 mA in 4096 Schritte unterteilt getrennt einstellbar.
- Acht Analogeingänge mit einstellbarer Empfindlichkeiten von 0 ... 10 V bis 0 ... 1 mV, bzw. im Strombetrieb von 0 ... 20 mA für alle Kanäle separat.
- Acht Digitalausgänge, mit denen sich externe Spannungsquellen schalten lassen, die maximale Verlustleistung soll 10 W für alle Ausgänge zusammen nicht übersteigen.
- Acht Digitaleingänge, mit TTL¹-Schaltniveaus
- Zähler, Frequenz- und Pulsbreitenmessung

¹TTL = transistor transistor logic

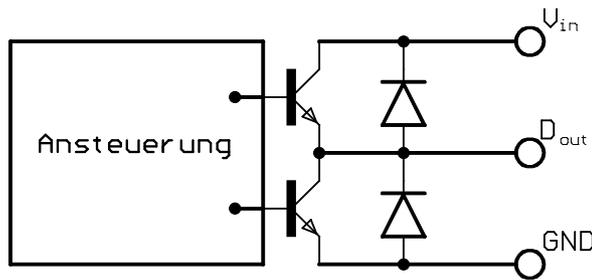


Abbildung 3.1: Prinzipskizze der elektronischen Schaltung des Digitalausganges^[62].

isiert werden. Aufgrund der schlechten Verfügbarkeit einer kommerziellen Lösung wurde eine solche selbst gebaut. Die Karte verfügt über eine 78-poligen Sub-D-Buchse, an diese wird mit einem mitgelieferten Stecker und ein Flachbandkabel die Schaltbox angeschlossen. Für jeden Kanal steht eine schraubbare Kabelbuchse zur Verfügung. Alle Ein- und Ausgänge können

Da im Laufe des Projektes vor allem die digitalen Ausgänge zum Einsatz kommen werden, zeigt die nebenstehende Abbildung deren elektronischen Aufbau skizzenhaft. Digitalausgänge sind in zwei Gruppen unterteilt (Gruppe A: Dout0-3; Gruppe B: Dout4-7), die Spannungsversorgung kann für beide Gruppen unabhängig voneinander vorgegeben werden. Um mit der Karte bequem arbeiten zu können, müsste eine externe Beschaltungsbox realisiert werden.

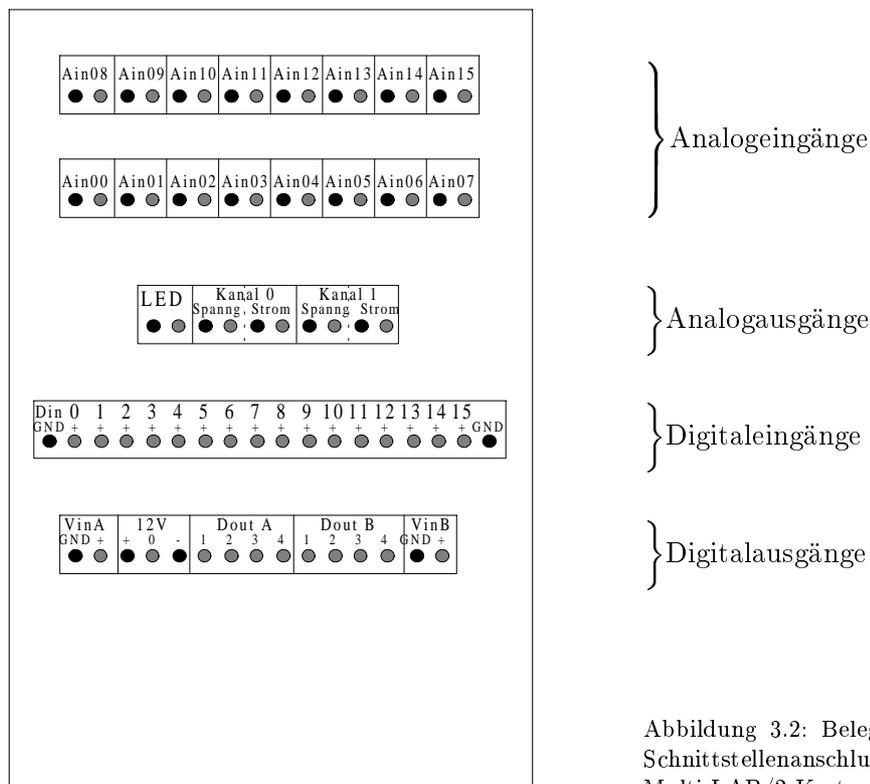


Abbildung 3.2: Belegungsplan der Schnittstellenanschlussbox für die Multi-LAB/2-Karte.

angeschlossen werden. Die Belegung dieser Schnittstellenbox ist der Abb. 3.2 zu entnehmen. Die Anordnung wurde so gewählt, dass die funktionell verschiedenen Kanäle auch räumlich getrennt sind. Oben sind die 16 Analogeingänge, darunter die Analogausgänge, in der vorletzten Reihe die Digitaleingänge und ganz unten die Digitalausgänge angeordnet. Zusätzlich stehen ganz unten auch die vom Computer gelieferten Spannungen ± 12 V zur Verfügung.

Ein Digitalausgang der Karte wird mit einer externen, variablen Versorgungsspannung beschaltet, um als zusätzlicher Frequenzgenerator zu dienen, mit dem die Sendeleuchte angesteuert wird. Es ergibt sich eine maximale Frequenz von 12,3 kHz, mit der der digitale Ausgang geschaltet werden kann. Für höhere Frequenzen muss der auf der Karte befindli-

che Mikroprozessor direkt programmiert werden. Die Programmierung geschieht in der Maschinensprache „Assembler“, der Code hierfür kann über mitgelieferte C-Routinen generiert werden. Der Kartenprozessor arbeitet intern mit einer Taktrate von 16 MHz ($= f_{Karte}$). Die so erreichte höchste Frequenz der Umschaltzyklen sollte bei 4 MHz liegen, da pro kompletten Schaltimpuls vier Befehle abgearbeitet werden. Messungen haben dies bestätigt. Neben der Messkarte wurde auch ein Frequenzgenerator (siehe Kapitel 3.5) für die Ansteuerung von Sendeschienen verwendet.

3.3 Netzgerät

Es steht eine Konstant-Spannungsquelle mit 0 ... 30 V und 0 ... 1 A zur Verfügung. Strom- und Spannungsbegrenzung sind getrennt regelbar. Die Stromregelung spricht recht zögernd und ungenau an, die angezeigten Stromwerte sind um etwa einen Faktor zwei zu klein. Alle Ströme und Spannungen werden daher ausschließlich mit einem Multimeter (siehe Kapitel 3.4) gemessen. Um sichergehen zu können, dass bei Langzeitmessungen am Prototyp Drift und Abweichungen verlässlich auf den Aufbau zurück zu führen sind, wurden sowohl Spannung als auch Strom über größere Zeiträume verfolgt. Die Spannungsstabilität wird mit dem Multimeter M3850D im Messbereich „V“ bei verschiedenen Spannungen über den Zeitraum von 20 Stunden durchgeführt. Zunächst wurde die unbelastete Spannungsquelle untersucht, anschließend war die Stromstabilität Untersuchungsgegenstand. Die Stabilität über den ganzen

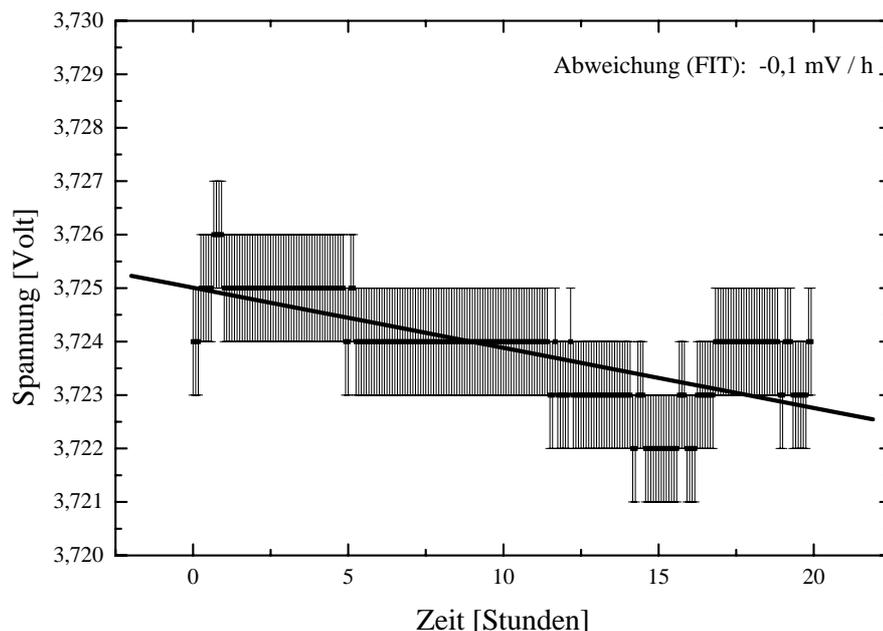


Abbildung 3.3: Spannungsstabilität bei $U=3,7$ V über 24 h, gemessen mit dem Digitalmultimeter DMM 3850D beschrieben in Kapitel 3.4

Messraum liegt im Bereich der angegebenen Messungenauigkeit des Messgerätes (die letzte Stelle der Anzeige kann um ± 1 schwanken, in dem benutzten Messbereich bedeutet das einen Fehler von 1 mV). Aus der Steigung der Ausgleichsgeraden lässt sich eine Langzeitdrift angeben. Dieser Wert lässt auch lange Messungen über Tage zu. Die Messung der Spannungsstabilität bei 8 V erfolgte unter den gleichen Voraussetzungen wie zuvor, die Messskala des Multimeters war gröber, der statistische Instrumentenfehler betrug 10 mV. Unter diesen Voraussetzungen waren keine Schwankung der Ausgangsspannung messbar. Für eine Spannung

von 13,8 V ergab sich ebenfalls keine messbare Abweichung über 24 h. Die Ergebnisse der Messungen sind hier noch einmal tabellarisch zusammengefasst:

Tabelle 3.1: Langzeitstabilität der vom Netzgerät gelieferten Spannung über den Zeitraum von 24 Stunden.

Spannung [V]	rel. Drift [ppm/h]	Drift [mV/h]
3,7	- 30	- 0,1
8,0	> 100	> 0,5
13,8	> 60	> 0,5

Für die Stromstabilitätsmessung wurde das Netzgerät mit einem 10 Ω Widerstand (10 Watt)

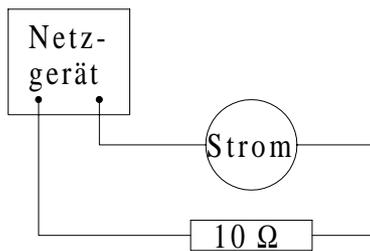


Abbildung 3.4: Messanordnung für die Strommessung.

belastet und der Strom in Reihe gemessen. Um Einflüsse durch Erwärmen des Widerstand zu minimieren, wurde er in einem Sandbad thermisch entkoppelt. Der Strom wurde über die Spannung so eingestellt, dass er jeweils knapp unter einem Skalenwechsel am Multimeter lag, um einen minimalen relativen Fehler zu erhalten. Gemessen wurde bei 39 mA, 500 mA, und 1000 mA. Einige Messungen wurden in mehreren Abschnitten durchgeführt, zum Teil auch um die Reproduzierbarkeit und Aufwärmzeit des Messgerätes beurteilen zu können. Über den Zeitraum von 24 Stunden kann ein geringer Strom von 40 mA (ohne

Abbildung) als stabil angesehen werden. Die einzelnen Strommesswerte weichen weniger als 0,5 % vom Mittelwert des Stromes ab. Bei höherem Strom (Abbildung 3.5, $I = 500$ mA) zeigt sich schon über einen relativ kurzen Zeitraum von 1,5 Stunden eine deutliche Drift in der Höhe von 0,5 mA pro Stunde als Steigung einer an die

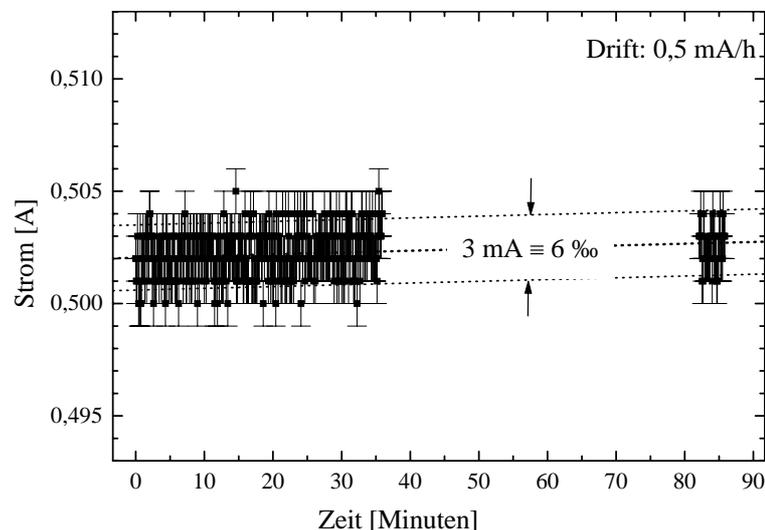


Abbildung 3.5: Die Abbildung zeigt die Entwicklung eines nach Figur 3.4 gemessenen Stromes über 1,5 Stunden. Dick gestrichelt ist eine Ausgleichsgerade an die Messwerte dargestellt, dünn gestrichelt die 1- σ -Umgebung.

Messwerte angepassten Ausgleichsgeraden. Die Streuung der Messwerte um den Mittelwert fallen sehr gleichmässig aus und weichen um nicht mehr als 3 % vom Mittelwert ab. Die letzte Stelle der Anzeige des Digitalmultimeters kann um ± 1 Digit schwanken. Bei noch

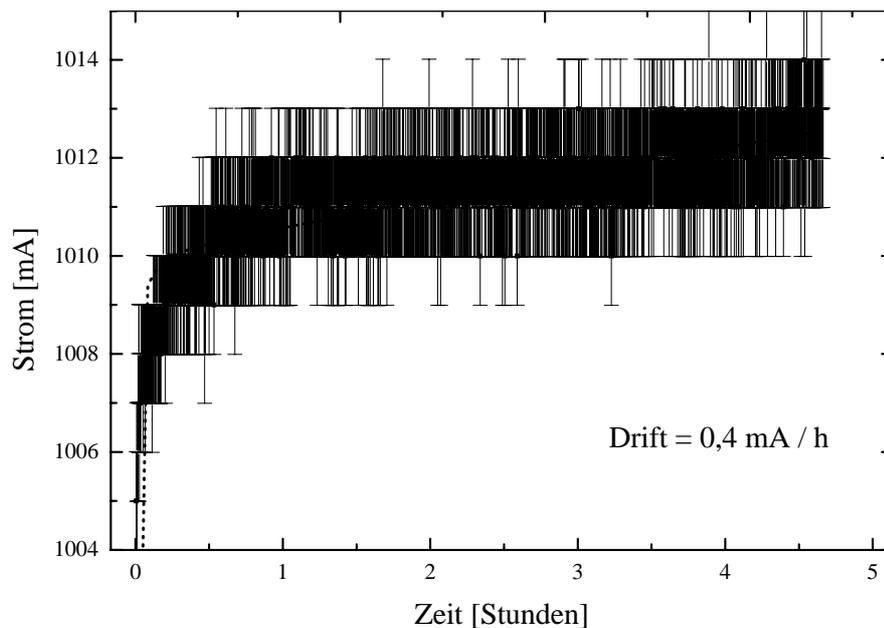


Abbildung 3.6: Es ist die zeitliche Entwicklung eines Stromes von 1000 mA über den Zeitraum von fünf Stunden dargestellt.

höherem Strom (Abb. 3.6) fallen thermische Effekte deutlicher auf. Zu Beginn der Messung (bis etwa eine Stunde) heizt sich vor allem der Messwiderstand auf (10 Watt Verlustleistung), sein Widerstand sinkt leicht. Sobald ein thermisches Gleichgewicht erreicht ist, driftet nur noch das Netzgerät mit etwa 0,4 mA pro Stunde. Alle Ergebnisse der Strommessung sind nachfolgend tabellarisch zusammengefasst:

Tabelle 3.2: Die vorgegebenen und gemessenen Ströme sind hier einander gegenübergestellt. Besonders bei Strömen ≤ 40 mA zeigt sich das Netzgerät stabil.

Strom		Streuung [%]	Drift [mA/h]	Drift relativ [pm/h]
nominell [mA]	gemessen [mA]			
40,0	39,42	0,5	< 0,1	< 2,5
500,0	502,5	3,0	0,5	1,0
1000,0	1011,5	3,0	0,4	0,4

3.4 Multimeter

Es wird das Digitalmultimeter DMM 3850D von Conrad eingesetzt. Über ein Schnittstellenkabel mit der Software Digiscope2.0 eine Kommunikation mit dem PC über den seriellen Eingang möglich. Alle am Gerät angezeigten Werte werden dem Rechner übermittelt. Eine Kontrolle der Einstellungen am Gerät vom PC aus ist jedoch nicht möglich. Vor allem Langzeitmessungen werden so einfach möglich. Alle Messungen in Kapitel 3.3 sind so entstanden. Neben den üblichen Strom- und Spannungsmessbereichen kann das Gerät Widerstands-, Kapazitäts- und Frequenzmessungen durchführen. Ebenfalls vorhanden ist ein Tester für Transistoren zum direkten Bestimmen von β (Verstärkungsfaktor: $\beta = \Delta I_C / \Delta I_B$). Betrieben wird das Multimeter mit einem 9V-Block, es werden wiederaufladbare NiCd-Akkus verwendet. Das Gerät hat eine Herstellergarantie von einem Jahr bis zum 7.3.1999. Das zum gleichen

Zeitpunkt auslaufende Kalibrierungszertifikat ist erneuert worden. Da fast alle elektrischen Parameter mit diesem Instrument durchgeführt werden, sind im Anhang B.2 alle Messbereiche und die Spezifikationen zur Genauigkeit und Reproduzierbarkeit wiedergegeben.

3.5 Frequenzgenerator

Mit der im Messrechner eingebauten Multi-LAB-Karte wird ein Funktionsgenerator simuliert. Die digitalen Ausgänge können in zwei Gruppen unabhängig voneinander mit einer externen Versorgungsspannung betrieben werden. So kann die Ausgangsspannung den Bedürfnissen der anzusteuern Quelle angepasst werden. Für die Lichtschiene wird eine Spannung von 12 V benötigt, die das Netzgerät des Computers stabil liefert. Für Langzeituntersuchungen wird auf das in Kapitel 3.3 charakterisierte Netzteil zurückgegriffen. Mit dem in PASCAL

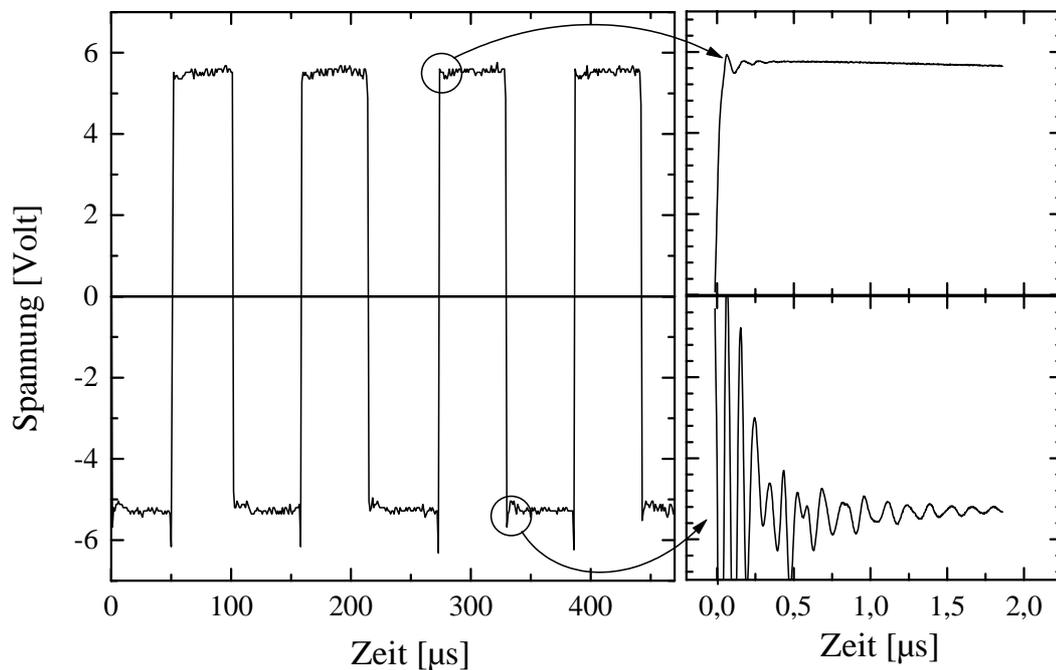


Abbildung 3.7: In der Abbildung links dargestellt ist der typische zeitliche Verlauf der Ausgangspulse der Multi-LAB-Karte. Rechts sind mit größerer zeitlicher Auflösung die Flanken gezeigt. Das starke Überschwingen bei den abfallenden Flanken kann der Sendeschiene schaden.

geschriebenen Programm „digiout4.exe“ (Quelltext im Anhang C.1) wird der Ausgang mit maximaler Taktrate ein- und ausgeschaltet über insgesamt 10^5 Perioden. Die maximal erreichbare Frequenz liegt bei 11,4 kHz. Wenn das Programm von Windows aus gestartet wird, gibt es immer wieder Systempausen und damit Taktunterbrechungen, nur direkt von DOS aus gestartet läuft das Programm kontinuierlich. Die Abbildung 3.7 zeigt die zeitliche Struktur der Pulse im Überblick und in höherer Auflösung die Ein- und Ausschaltvorgänge, wo sich starkes Überschwingen bemerkbar macht. Diese Spannungsverläufe sind mit einer Lichtschiene mit 12 SMD-LEDs aufgenommen worden, der Strom betrug 30 mA. Das starke Überschwingen zeigte sich unabhängig vom zu treibenden Strom. Für höhere oder genau bestimmte Frequenzen lässt sich die Karte mit einem internen Betriebssystem im sogenannten Echtzeitmodus mit einer Taktrate von 16 MHz programmieren. Bedingt durch die kleinste Schaltzeit ($2T_{Karte} = 2/f_{Karte} = 125 \cdot 10^{-9} \text{ s} = 125 \text{ ns}$) kann die gewünschte Frequenz von etwa $f_0 \approx 8 \text{ kHz}$ für die Sendeschiene auf etwa $\Delta T_0/T_0 = 2T_{Karte} \cdot f_0 \approx 1 \cdot 10^{-3} = 0,1\%$

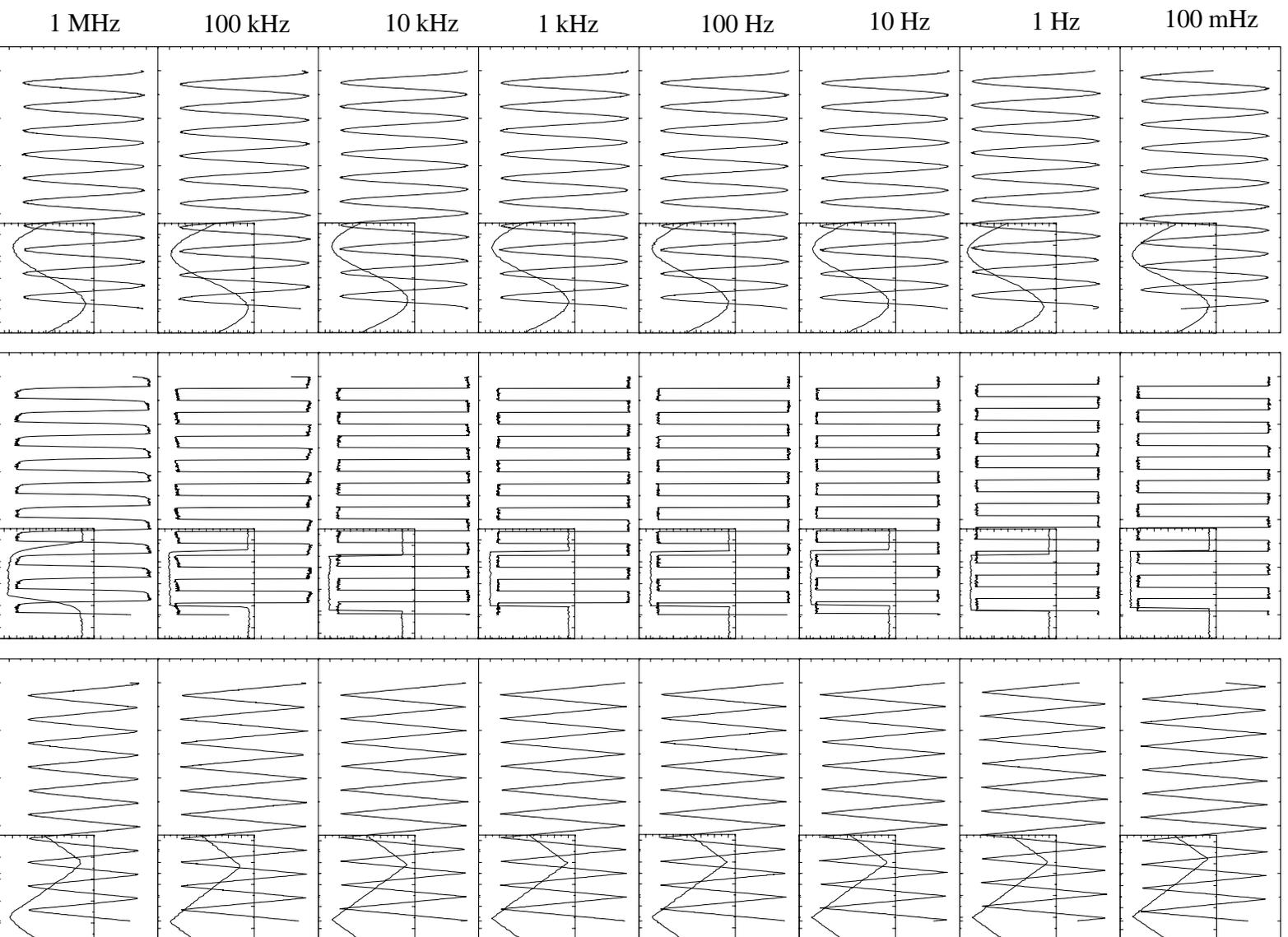


Abbildung 3.8: Hier sind im Vergleich die zeitlichen Verläufe der drei verschiedenen Pulsformen aus allen einstellbaren Dekaden dargestellt. Der jeweilige Inset zeigt eine Schwingperiode in höherer zeitlicher Auflösung und lässt bei hohen Frequenzen die begrenzte Bandbreite beim Rechteck- und Dreieckspuls erkennen.

genau eingestellt werden, also auf etwa 8 Hz genau. Damit ist die Karte nur etwa ein hun-

dergestellt so genau, wie der im folgenden vorgestellte Frequenzgenerator. Demgegenüber ist die Drift über längere Messzeiten gegenüber der des Generators (siehe Abbildung 3.9) vernachlässigbar, wenn man annimmt, dass eine Frequenzverschiebung durch eine Alterung der Frequenznormale auf der Messkarte und dem Rechner zustande kommen kann. Nach ^[70] kann man für Quarze von einer Alterung in einem Rechner von etwa 15 ppm pro Jahr ausgehen, die Temperaturveränderlichkeit liegt im Bereich von 100 ppm. Daraus ergeben sich Frequenzverschiebungen von maximal 0,8 Hz über lange Zeiträume. Da jedoch die Variation der Frequenz mit der Karte nur durch Neuprogrammierung und nicht präzise genug möglich ist, wurde zusätzlich ein Frequenzgenerator angeschafft. Dieser erzeugt Frequenzen von 10 mHz bis 2 MHz. Direkt über ein eingebautes Messgerät wird die eingestellte Frequenz mit einer Genauigkeit von $\Delta f/f = 10^{-6}$ angezeigt. Es stehen drei verschiedene Signalformen zur Verfügung: Sinus, Rechteck- und Dreieckspannung. Die Amplitude ist stufenlos zwischen 10 mV und 10 V bei einer Ausgangsimpedanz von 1 M Ω einstellbar. Es können Frequenzläufe über einen Bereich von bis zu drei Dekaden und mit variabler Geschwindigkeit eingestellt werden. Ebenso ist die Kontrolle der Ausgangsfrequenz über eine von außen vorzugebene Spannung im Bereich zwischen 0 ... 5 V möglich. Mit einem zweiten Frequenzgenerator können so sehr bequem Transienten von Filtern aufgenommen werden. Für die Triggerung eines Oszilloskopes wird zusätzlich zum Ausgangssignal ein TTL-Puls gleicher Frequenz generiert. Das Ausgangssignal ist in seiner Symmetrie veränderbar, so kann z. B. beim Rechteckpuls das Aspektverhältnis $\tau_{an} : \tau_{aus}$ von ca. 20:1 bis 1:20 variiert werden. Die Abbildung 3.8 auf Seite 29 zeigt das Ausgangssignal des Generators für die drei verschiedenen Kurvenformen für alle Dekaden des Frequenzbereichs bei exakt symmetrischer Einstellung, d. h. $\tau_{an} : \tau_{aus} = 1 : 1$. Dieser Modus „ $\tau_{an} = \tau_{aus}$ “ kann über einen Schalter gewählt werden und ist auf $1 - \text{freq}\tau_{an}\tau_{aus} \approx 2 \cdot 10^{-3}$ genau.

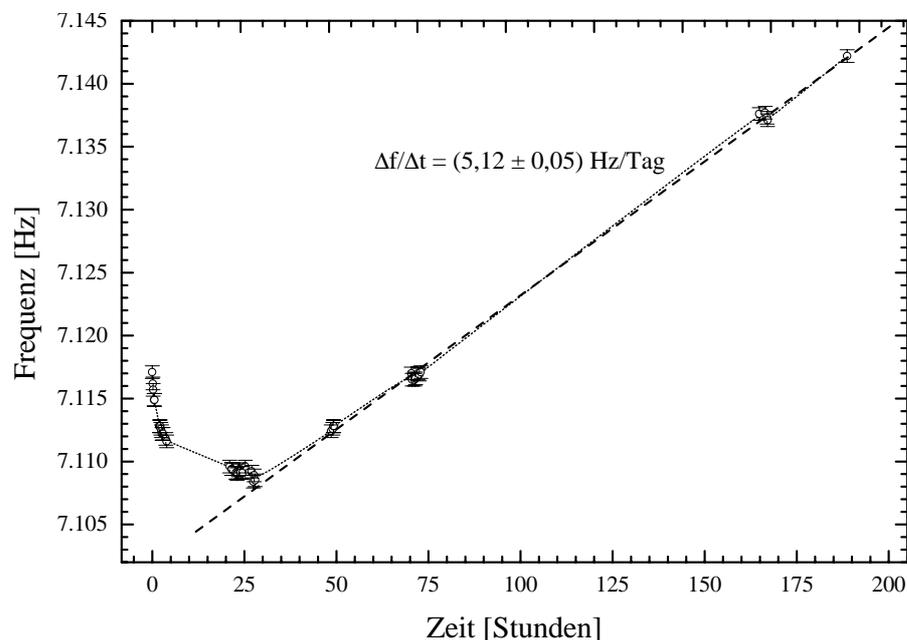


Abbildung 3.9: Die Ausgangsfrequenz des mit einer Lichtschiene mit 1 k Ω belasteten Frequenzgenerators wurde über mehrere Tage gemessen und hier aufgetragen. Es zeigt sich am Anfang der Messung eine Abnahme um etwa 9 Hz, in der folgenden Messwoche steigt die Frequenz konstant um circa 5 Hz pro Tag an.

In der obenstehenden Abbildung 3.9 ist das Driftverhalten des Generators dargestellt. Am ersten Tag nahm die Frequenz leicht ab (9 Hz) und stieg dann in der folgenden Messwoche mit einer recht konstanten Rate von $\Delta f/\Delta t \approx 5$ Hz/Tag an. Die Drift liegt in der Größen-

ordnung von $\frac{\Delta f/f}{t} = 7 \cdot 10^{-4} \frac{1}{Tag}$. Im Vergleich zur Frequenzbreite des Eingangsverstärkers der Auswertelektronik (s. Kapitel 5.2) von etwa $\Delta f_{Filter} = 200$ Hz ($\frac{\Delta f_{Filter}}{f_{Filter}} = 2 \cdot 10^{-2}$) ist die Drift um etwa den Faktor 30 geringer. Daher wurde dieser Einfluss auch für längere Messkampagnen über mehrere Tage oder Wochen vernachlässigt.

3.6 Digitaloszilloskop HP350SX

Die in Kapitel 3.5 gezeigten Zeitstrukturen der Pulse wurden mit einem Digital-Speicheroszilloskop der Firma HP aufgenommen. Das Gerät verfügt bei einer analogen Bandbreite von 400 MHz unter anderem über Cursorfunktionen, automatische Messprotokolle, Vergleichsmessungen, In-situ-Fast-Fourier-Transformation. Für die genaue Beschreibung und technischen Daten sei hier auf das umfangreiche Bedienerhandbuch^[86] verwiesen. Die dargestellten Schirmbilder können in verschiedenen Formaten über das eingebaute Laufwerk auf Diskette gespeichert werden.

Leerlaufmessungen mit offenem Eingang haben einige sehr starke Störeinflüsse mit konstanter Frequenz und Amplitude aufgezeigt. Diese können das Rauschen eines ungeschirmten Aufbaus erheblich vergrößern. Besonders zu nennen, ist eine Störung bei 695 kHz und eine bei 3 kHz mit unregelmäßig auftretenden Seitenbändern ($\pm 1,5$ kHz). Die Abbildung 3.10 zeigt oben eine Übersicht über das Frequenzspektrum der Störungen von 0 bis 1 MHz. Es stellt eine Mittelung über die Fouriertransformierten von 256 Einzelmessungen dar. Darunter sind die Störungen mit größerer Auflösung in verschiedenen Einzelmessungen gezeigt. Die Pulse der Seitenbänder des 3 kHz-Peaks haben je einen Abstand von 230 Hz. Die Ursache dieser Störungen konnten im Rahmen dieses Projektes nicht gefunden werden^{[28][29][30][31][32][33]}. Die Schaltung konnten abgeschirmt werden, bei Messungen über Zuleitungskabel erhöhten sie allerdings das Restrauschen (zum vgl. siehe Abbildung 5.2). Der Rauschpegel zeigt sich linear zur Kabellänge. Die erwähnte Mittelung über mehrere Einzelmessungen ist eine weitere nützliche Funktion des Oszilloskops. Man ist so in der Lage, auch bei stark verrauschten Signalen mit der Periode des Triggers oszillierende Anteile zu diskriminieren und analytisch verwertbar darzustellen.

3.7 Thermoschrank

Für alle Messungen an Komponenten des mechanischen und elektrischen Aufbaus bezüglich ihrer Stabilität gegenüber Umwelteinflüssen steht ein Klimaschrank „Platinous Expansive PU1“ der Firma Tabal zur Verfügung. In einem Raumvolumen von $60 \times 60 \times 60$ cm³ können Temperaturen zwischen $-40 \dots +100^\circ\text{C}$ erzeugt und über Tage stabil gehalten werden. Über verschiedene Kanäle sind Zuleitungen von außen möglich, so dass auch Temperaturwechsel bei laufendem Betrieb von Komponenten oder Systemen möglich ist. Die Luft im Innenraum wird umgewälzt, Messungen mit einem Miniatur-Platin-Thermoelementen mit einer Zeitkonstante von wenigen hundert Millisekunden haben gezeigt, dass sich im Innenraum im Zeitintervall von wenigen Minuten eine gleichmäßige Temperaturverteilung einstellt. Als Faustformel hat sich eine Zeit von etwa 0,5 Minuten ($\approx 3 \cdot \tau_{TG}$) pro Kelvin Temperaturveränderung als nützlich erwiesen. Die Solltemperatur lässt sich auf etwa 1°C genau vorgeben. Die Messungen mit Platin-Thermoelementen^[69] ergaben eine Abweichung von höchstens $\pm 1^\circ\text{C}$ von der Solltemperatur. Für Verlaufsmessungen wurde wegen leichter Überschwingungen der Regelelektronik des Schrankes immer bei Maximalwerten begonnen und der thermische Ausgleich gegen Raumtemperatur für Zwischenwerte genutzt. Die thermische Isolierung und damit die Zeitkonstante war sehr groß, sie lag im Bereich von $\tau_{Drift} \approx 30$ Minuten, d. h. es kann zu jedem Zeitpunkt von einem thermischen Gleichgewicht ausgegangen werden ($\tau_{Drift}/\tau_{TG} \approx 200 : 1$).

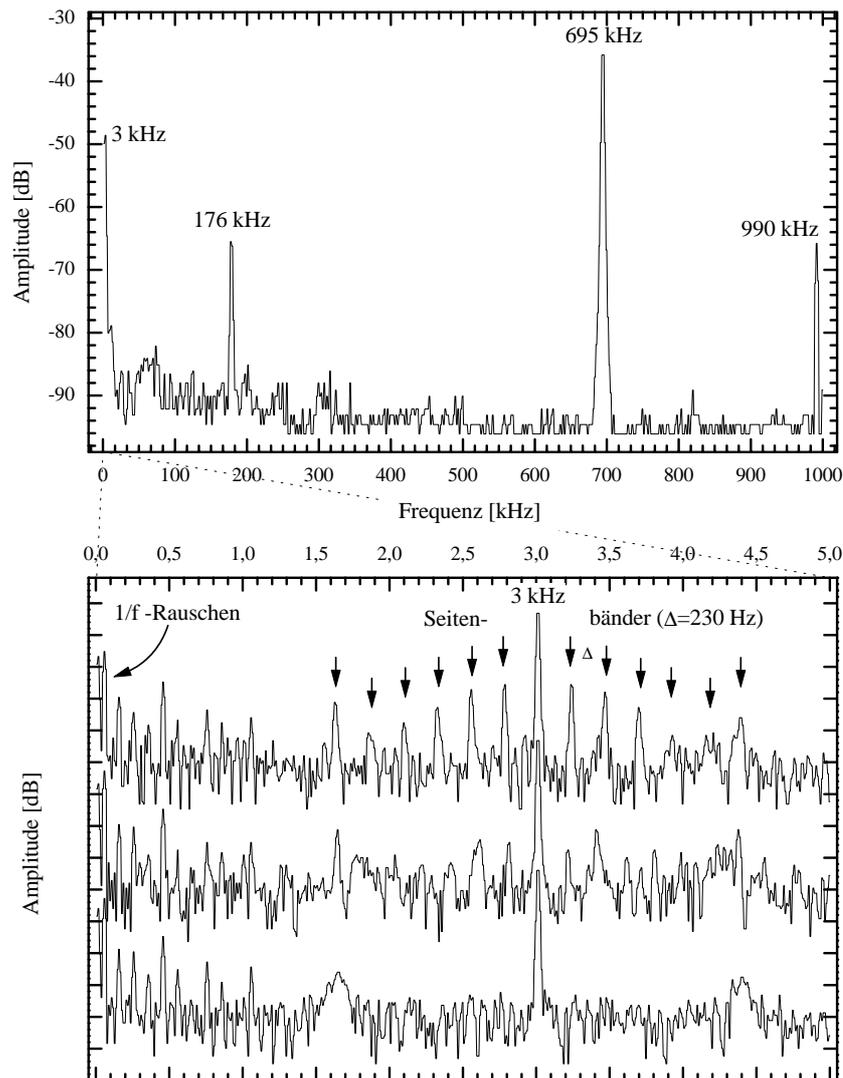


Abbildung 3.10: Oben dargestellt ist die Fouriertransformierte des Rauschsignals, das bei offenem Eingang am Oszilloskop zu messen ist. Unten ist in einer Ausschnittsvergrößerung das Störsignal bei 3 kHz genauer dargestellt. Die regelmäßigen Seitenbänder lassen auf eine Maschine als Störquelle schließen. Die Suche im Gebäude hat bisher keinen Erfolg gebracht.

Für weniger genaue und stabile Temperaturen über Raumtemperatur standen zwei weitere Öfen von ILM zur Verfügung. Mit diesen Geräten ließen sich Temperaturen von $+35 \dots +250^\circ\text{C}$ mit einer Genauigkeit von $\pm 3^\circ\text{C}$ in einem Volumen von etwa $60 \times 60 \times 60 \text{ cm}^3$ realisieren. Dieser Ofen wurde eingesetzt, um schnelle Temperaturwechselbelastungen durchzuführen. Die Testkomponenten wurden zwischen zwei Öfen zwischen -40° und bis zu $+120^\circ$ in etwa 10 Sekunden transferiert und für fünf bis sechs Minuten im jeweiligen Ofen belassen, damit sich thermisches Gleichgewicht einstellen kann. Auf diese Weise sind Wechsellasts mit bis zu 80 Zyklen durchgeführt worden.

Mit dem beschriebenen Aufbau war es möglich nahezu alle Fragestellungen bezüglich der elektrischen und mechanischen Komponenten quantitativ zu beantworten und ihre Eigenschaften zu charakterisieren.

Kapitel 4

Lichtschiene

4.1 Basismaterial für die Lichtschienen

Die Lichtschienen bestehen elektrisch aus einem Leiterstreifen aus dem Trägermaterial FR5, strukturiert durch die Firma Loch Leiterplatte GmbH, ein glasfaserverstärktes Epoxydharz-Standard-Platinenmaterial, das mit den von SLI¹ Miniature Lighting GmbH (vormals OSA Elektronik GmbH) hergestellten SMD-LEDs² durch die Firma Sprehybrid GmbH bestückt wird. Der Streifen ist beidseitig mit Leiterbahnen belegt und mit Reflow-lötbareren Zinnfeldern und Lötstopplack beschichtet. Auf der Rückseite wird die Versorgungsspannung von 12 V geführt und in regelmäßigen Abständen zur Oberseite durchkontaktiert, wo je 5 LEDs im Fall der langwelligen IREDS¹ und ein Vorwiderstand elektrisch eine funktionelle Gruppe bilden. Bei kürzeren Wellenlängen und damit höheren Flußspannungen können nur noch drei LEDs pro Gruppe bei 12 V angeordnet werden, die Grenze verläuft zwischen gelb und grün emittierenden Leuchtdioden. Die folgende Skizze zeigt den zuerst beschriebenen Aufbau:

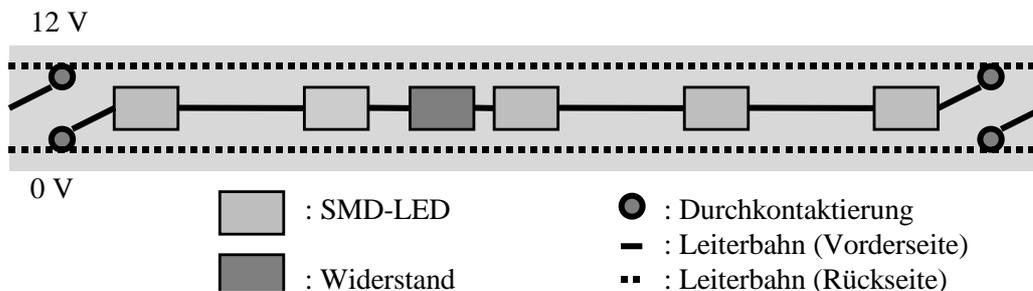


Abbildung 4.1: Ausschnitt des mechanischen und elektrischen Aufbaus der Platine der Lichtschiene in schematischer Darstellung. Der gezeigte Abschnitt ist real 5 cm lang und wiederholt sich pro Meter Lichtschiene 20 mal, d. h. 100 LEDs/Meter. Der Leiterstreifen mit SMD-LEDs ist 2 bis 4 mm hoch (je nach LED-Typen) und 4,5 mm breit.

Ein wesentliches Problem stellt die thermische Ausdehnung des Materials dar, die gesamte Lichtschiene ist ein Verbund aus den verschiedensten Materialien und soll auf mineralisches Glas aufgeklebt werden. Dieses wird in Kapitel 4.5 näher beleuchtet. Die nachfolgende Tabelle listet einige physikalischen Eckdaten des Platinenmaterials nach Herstellerangaben auf:

¹IREDD = Infrared Emitting Diode (Infrarote Strahlung emittierende Diode)

¹SLI = Silvaner Light International, Boston, USA

²SMD-LED = Surface Mounted Device - Light Emitting Diode (Oberflächenmontierbare Leuchtdiode)

Durchschlagfestigkeit	:	45	kV
Durchgangswiderstand	:	1012	Ωcm
Lötbadfestigkeit bei 260°C	:	20	s
Biegefestigkeit, längs	:	420	N/mm^2
Biegefestigkeit, quer	:	350	N/mm^2

Tabelle 4.1: Physikalische Parameter des Platinenmaterials FR5 nach Herstellerangaben.

4.2 Sendeschiene

Auf die im Kapitel 4.1 kurz eingegangene Platine werden (beim Prototyp zunächst in Handarbeit später dann) maschinell die SMD-LEDs aufgebracht. Für die Sendeschienen werden im Infraroten bei einer Wellenlänge von 840 nm emittierende IREDs verwendet. Die Chips mit einer Abmessung von $0,26 \times 0,26 \text{ mm}^2$ sind Standard-Chips mit entsprechender Verfügbarkeit und Preis und werden auf Standard-SMD-Gehäusen eingebracht. Die nebenstehende Skizze zeigt die geometrische Struktur der SMD-Sendediode, genau zentriert eingezeichnet sitzt der Halbleiterchip mit einem Bonddraht aus Gold. Die Produktion der Dioden erfolgt komplett bei SLI. Auf eine Lichtschienenplatine, wie in Abbildung 4.1 gezeigt, werden diese IREDs von Hand aufgelötet. Der zu benutzende Vorwiderstand ergibt sich aus der Betriebsspannung ($U_0 = 12 \text{ V}$) und der für den gewünschten Betriebsstrom ($I_0 = 25 \text{ mA}$) nötigen Flußspannung der IRED von $U_F = 1,33 \text{ V}$ nach

$$R_{Vor} = \frac{U_0 - 5 \cdot U_F}{I_0} \approx 220 \Omega \quad (4.1)$$

Die Durchlaßspannung kann mit dem Digitalmultimeter 3850D (siehe Kapitel 3.4) direkt bestimmt werden, die Flußspannung ergibt sich aus einer aufgenommenen Kennlinie, die in Abbildung 4.3 in normaler und im Einsatz in logarithmischer Achsenskalierung dargestellt ist. Die Durchbruchspannung läßt sich geometrisch als Schnittpunkt einer an die Stromflanke angepaßten Geraden mit der x-Achse bestimmen^[10]. Für die IRED ergibt sich $U_{Durch} = 1,272 \text{ V}$. Praktisch gesehen ist dies die Spannung, ab der die Leuchtdiode beginnt infrarote Strahlung zu emittieren^[84].

Für Messungen optischer Parameter stehen Meßphotodioden zur Verfügung, die in ihren Eigenschaften über einen Zeitraum von zehn Jahren bekannt, protokolliert und stabil sind^[36]. Die Abbildungen 4.4 und 4.5 zeigen die wichtigen Parameter. Über Messung des Photostroms kann die Lichtstärke gemessen werden, sofern die Wellenlänge, bei der gemessen wird, bekannt ist. Die Silizium-Photodioden zeigen eine deutliche Abhängigkeit ihrer Empfindlichkeit von der Wellenlänge (siehe Abb. 4.4) und haben ihre maximale Empfindlichkeit bei $\lambda_{max} \approx 950 \text{ nm}$.

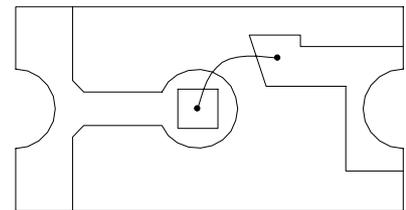


Abbildung 4.2: Layout des SMD-Dioden-Gehäuses nach neuer Bauart mit den Außenabmessungen $3,20 \times 1,60 \text{ mm}^2$

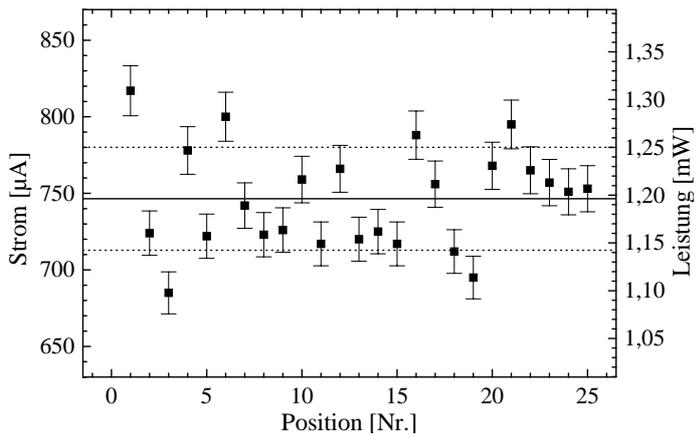


Abbildung 4.6: Optische Ausgangsleistung der einzelnen Individuen auf der Sendeschiene.

werden kann, daß nahezu die gesamte, von einer Diode emittierte IR-Strahlung detektiert wird. Die Integration der Abstrahlcharakteristik über den Raumwinkelanteil ergibt etwa 93 %. Mit einem Multimeter wird der Kurzschlußstrom der Photodiode gemessen. Für die Wellenlänge der Sendeschiene ist die Empfindlichkeit fast maximal und liegt bei $0,624 \text{ A/W}$ bzw. $624 \mu\text{A/mW}$. Bei der Vermessung der einzelnen Dioden auf der Sendeschiene zeigen sich deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Individuen. Der Mittelwert der Leistung liegt bei $1,20 \text{ mW}$ mit einer Abweichung von $0,05 \text{ mW}$ (1σ -Umgebung). In Abb. 4.6 ist der Mittelwert als durchgezogene Linie die 1σ -Umgebung als gestrichelte Linien eingezeichnet. Ein ebenfalls sehr wichtiger Punkt der optischen Parameter stellt die Abstrahlcharakteristik der Dioden mit ihren klarem Epoxydharzverguß dar. Um diese zu bestimmen, wurde eine Diode fixiert und

Die einzelnen Dioden auf der fertigen Sendeschiene wurden mit der kalibrierten Photodiode (PD²-50-6) in ihrer Leuchtstärke untersucht. Dazu wurde die Meßdiode direkt auf jede einzelne IRED aufgesetzt, wodurch sowohl der Einfluß des Raumlichts als auch der der Nachbardioden gering gehalten wurde. Die Meßfläche ist mit einem Durchmesser von $11,28 \text{ mm}$ (Meßfläche $A = 100,0 \text{ mm}^2$) bei einem Abstand von weniger als einem Millimeter so groß, daß davon ausgegangen

²PD = Photodiode

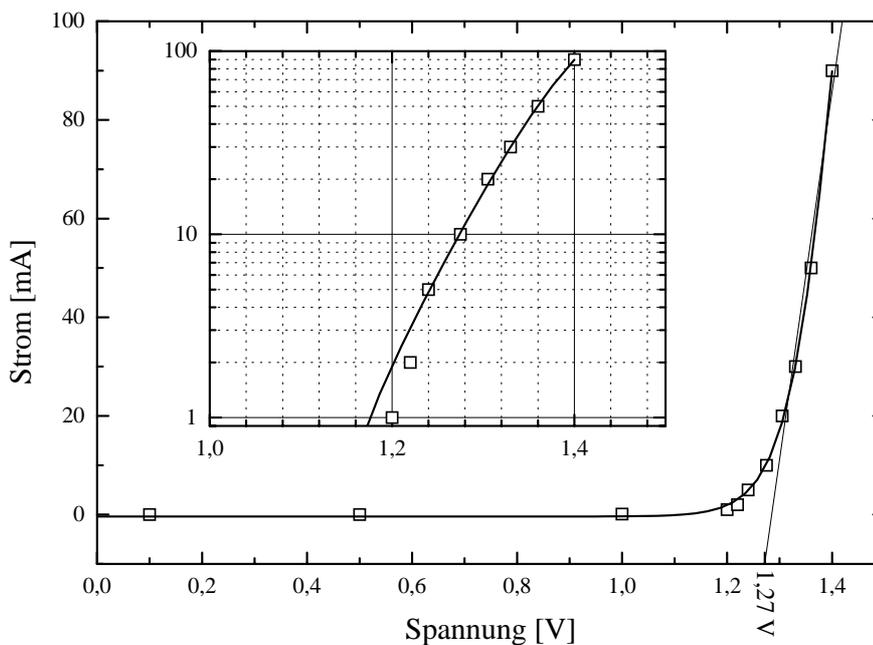


Abbildung 4.3: Strom-Spannungskennlinie einer IRED in normaler und im Einsatz links oben in logarithmischer Darstellung.

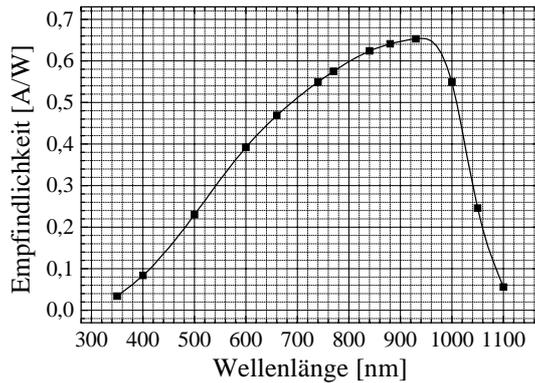


Abbildung 4.4: Spektrale Empfindlichkeit der Photodiode PD-50-6, die Werte zwischen 600 nm und 940 nm sind aus dem Kalibrierdatenblatt, die restlichen aus der Produktbeschreibung extrapoliert.

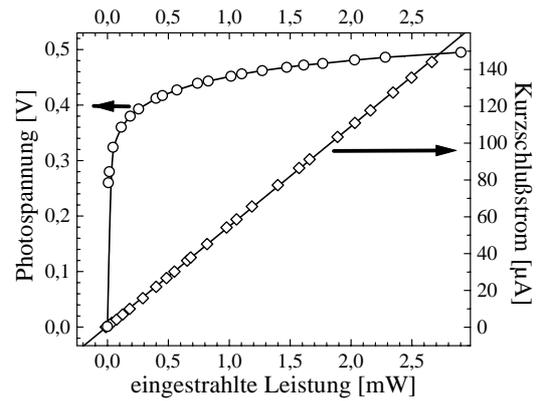


Abbildung 4.5: Elektrische Kenndaten der Photodiode PD-50-6, Photospannung und Photostrom sind über eine vorgegebene Lichtleistung (zuvor kalibrierte Leuchtdiode) aufgetragen.

unter verschiedenen Winkeln mit einer Photodiode mit geringerem Durchmesser ($d = 5 \text{ mm}$) als die zuvor beschriebene PD-50-6, das in einer bestimmten Richtung abgestrahlte Licht gemessen.

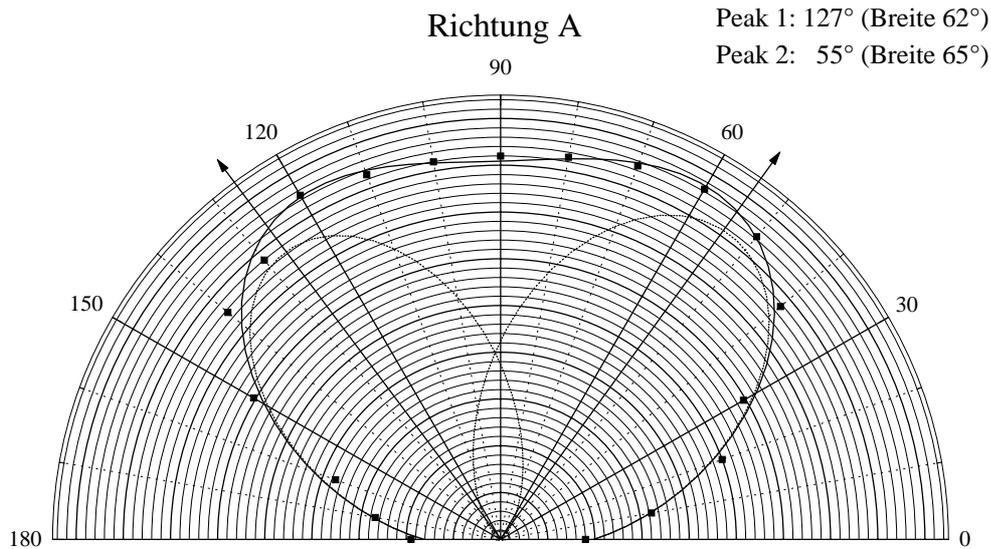
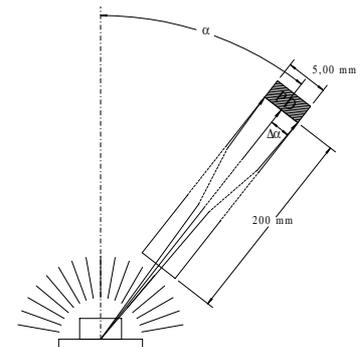


Abbildung 4.7: Räumliche Abstrahlcharakteristik der IREDs in Richtung A (Beschreibung der Richtung: siehe Text).

Um eine Einstrahlung von anderen Seiten zu vermeiden, also um das Licht zu kollimieren, wurde die Photodiode an das eine Ende eines etwa 200 mm langen, von innen geruhten Metallrohrs angebracht. Damit war auch der Winkel α ausreichend genau zu bestimmen:

$$\Delta\alpha = \arctan\left(\frac{2,5\text{mm}}{200\text{mm}}\right) = 0,7^\circ \quad (4.2)$$

Zum Teil wurden diese Abstrahlcharakteristiken mit einem im Rahmen dieses Projektes entwickelten und ge-



bauten Meßkopfes aufgenommen, der im Anhang B.3 näher beschrieben wird und die Messungen sehr stark beschleunigt und vereinfacht. Bei Messungen sind zwei verschiedene Bauelemente-Achsen besonders ausgezeichnet, waagrecht (lange Achse) und horizontal (kurze Achse) durch den Bauteilmittelpunkt. Erstere wird im folgenden immer Richtung A genannt, die andere Achse heißt Richtung B. Wenn das Bauelement flach auf dem Papier liegt, definiert nach links gehendes Licht (siehe Abb. 4.2) den Winkel 180° , aus der Papierebene zum Betrachter hin sind 90° , genau nach rechts 0° . In Richtung A verläßt genau nach oben gehendes Licht die Diode unter dem Winkel 180° , zum Betrachter hin unter 90° und nach unten führendes unter 0° . In beiden Richtungen zeigen sich zwei Intensitätsmaxima, die aller-

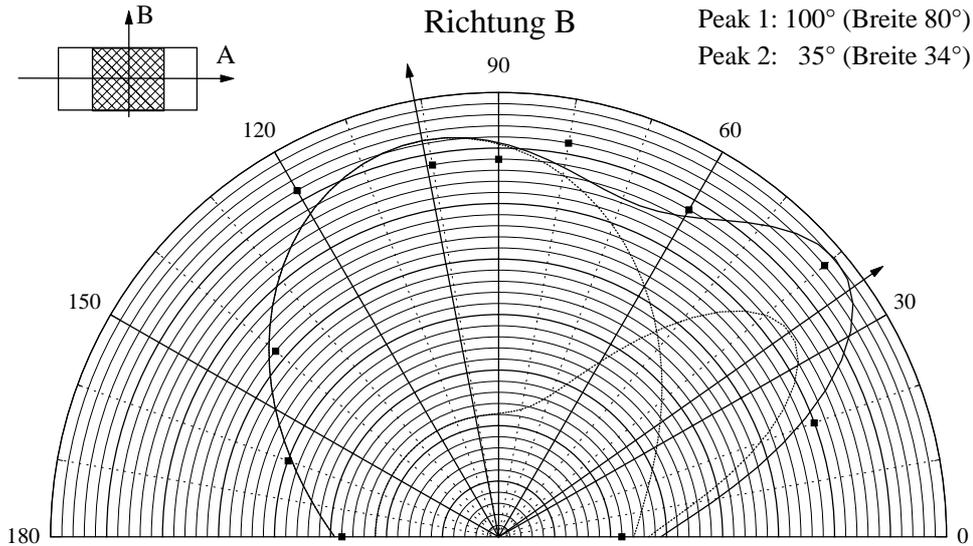
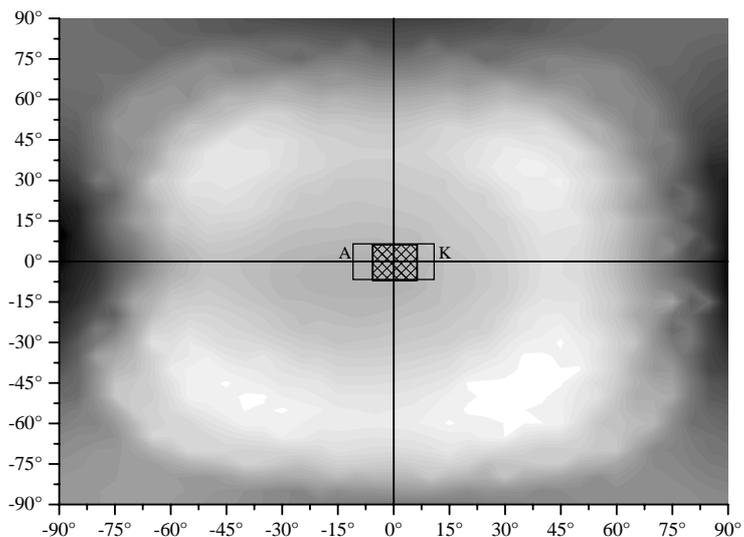


Abbildung 4.8: Räumliche Abstrahlcharakteristik der IREDS in Richtung B (Beschreibung der Richtung: siehe Text bzw. Inset links oben).

dings in Richtung A unterschiedlich stark ausgeprägt sind (man vergleiche die Abbildung 4.7 mit 4.8). Bei den Intensitätsmaxima in den beiden Richtungen ist jedoch nicht klar, ob es sich um absolute Maxima handelt, oder ob in eine nicht in den Hauptebenen liegende Richtung noch mehr Licht emittiert wird. Daher wurde ein räumliche Abstrahlprofil aufgenommen:

Abbildung 4.9: Räumliche Abstrahlungcharakteristik einer IRED bei einer Wellenlänge von $\lambda = 840 \text{ nm}$. Die Winkelachsen geben den Blickwinkel auf das Bauelement bezüglich der beiden Achsen an. Die vier Maxima entsprechen in etwa dem Blick durch die Vergußecken. Ein Schnitt entlang der wagerechten Achse würde Abb. 4.7 reproduzieren.



Die Aufnahme der räumlichen Abstrahlung zeigt, daß etwa in die Blickrichtung durch die Ecken auf den Chip (Koodinaten ($\pm 45^\circ / \pm 45^\circ$)) besonders viel Licht gemessen werden kann. Es handelt sich um einen geometriebedingten Effekt, in diesen vier Richtungen sieht man neben der direkten Abstrahlung durch die abgerundeten Vergußecken auch von den drei sichtbaren Seitenflächen in Blickrichtung gebrochenes Licht vom IRED-Chip, die nebenstehende Skizze illustriert dies. Durch den Brechungsindexunterschied wird das Licht des Chips, das intern um 8° von der Raumdiagonalen abweicht, extern parallel zu dieser abgestrahlt. Wird eine Diode mit ihrer Endfläche auf Glas aufgeklebt, erhält die Abstrahlung eine andere Charakteristik, da die Grenzflächenbrechung deutlich verändert wird ($n_{\text{Glas}} \approx n_{\text{Epoxy}}$). Daher wurden zum einen ein reiner, unverkappter Chip sowie das fertige Bauelement in einer Immersionslösung in seiner Abstrahlcharakteristik untersucht. In beiden Fällen zeigt sich die theoretisch erwartete Abstrahlung eines Punktstrahlers^{[5][65]}.

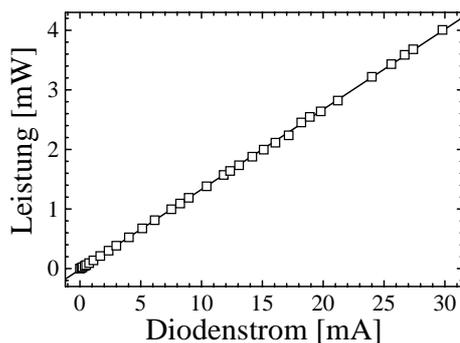
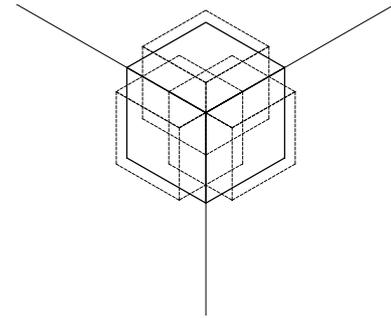


Abbildung 4.10: Optische Ausgangsleistung einer IRED in Abhängigkeit vom Diodenstrom gemessen mit der beschriebenen, kalibrierten Photodiode PD-50-6

Für eine optimale Einkopplung des emittierten IR-Lichtes ist die konkrete Anordnung der Diode auf dem Leiterplattenstreifen und der Neigungswinkel gegenüber der Glasplatte, in die eingekoppelt werden soll, von Bedeutung. Es zeigte sich allerdings eine nur geringe Abhängigkeit, wenn man das durch die Scheibe hindurch tretene Licht in Abhängigkeit vom Einkoppelwinkel untersucht. Für den Prototyp wurde daher der technisch günstigste Winkel von 45° gewählt. Durch reflektierende Beschichtungen konnte man die Abstrahlung in eine bestimmte Richtung erhöhen und die optischen Lichtverluste reduzieren. Es zeigte sich aber, daß die Erhöhung der Intensität am anderen Ende der Scheibe nur um circa 5% stieg und damit den hohen

Aufwand für das Kantenverspiegeln nicht rechtfertigt. Neben den geometrischen Aspekten wurden auch die elektrischen Eigenschaften untersucht (Abbildung 4.10). Die Lichtausgangsleistung der Dioden zeigt sich bis zum maximalen Nennstrom als sehr linear zum Ansteuerstrom. Damit ist gewährleistet, daß eine elektrisch vorgegebene Pulsform in ein entsprechendes Lichtstärkeprofil gewandelt wird. Die Lichtleistung zeigt im hier untersuchten Strombereich keinen Übergang zu einer Sättigung. Bei zu hohem Leistungsumsatz wird nicht mehr die gesamte im Chip generierte Verlustleistung abtransportiert, im Chip steigt durch den Wärmestau die Sperrschichttemperatur an. Mit steigender Temperatur sinkt allerdings der Wirkungsgrad, eine Strom-Lichtausgangsleistungs-Kurve zeigt dann einen Übergang in eine Sättigung^[84]. Mindestens bis zu einem Strom von $I_{max} = 30$ mA kann das Bauelement als frei von thermischem Streß angesehen werden. Für eine geeignete Ansteuerlektronik (siehe Kapitel 5.8) ist demnach die Wahl der richtigen Stromstärke unterhalb der maximalen unkritisch, hier können elektrische Aspekte, wie Signal-Rausch-Verhältnis und Leistungsaufnahme Berücksichtigung finden.

4.3 Empfängerschiene

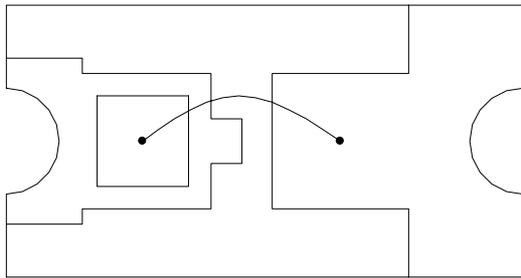


Abbildung 4.11: Layout einer SMD-Diode der Bauform 1206 mit den Maßen $3,20 \times 1,60 \text{ mm}^2$ im Maßstab 20:1.

Für die Empfängerschienen werden Photodioden-Chips der Firma EPIGAP Optoelectronic GmbH, Berlin in ein anderes SMD-Gehäuse als bei der Sendeschiene eingebaut, da die Photodioden-Chip deutlich größer sind, als bei den IREDS. Die Abb. 4.11 zeigt die Geometrie dieser Bauteile. Man kann so auch mit dem Auge leichter zwischen den beiden Varianten unterscheiden. Die fertigen SMDs werden für den Prototypen auf einem Platinenstreifen aufgelötet, der nicht mit Lötstopplack beschichtet ist. Die Dioden werden auf der Rück-

seite auf die Streifen aufgelötet, die eigentlich die Versorgungsspannung tragen sollen. So sind alle Dioden direkt parallel geschaltet. Die Meßgröße für das einfallende Licht ist der Sperrstrom, in einer Parallelschaltung addieren sich die Ströme. Der Funktionstest ist hier etwas ungenauer. Zum einen ist es relativ schwer, definierte Beleuchtungsstärken zu realisieren, zum anderen müßten gleichzeitig alle anderen Photodioden abgedeckt sein. Für die definierte Beleuchtungsstärke wurde eine künstlich durch Tempern³ gealterte und damit sehr lichtstabile rote LED verwendet^[1], die kollimiert nacheinander über die einzelnen Individuen gehalten wird. Mit der Messung des Photostromes in jedem einzelnen Fall kann sichergestellt werden, daß keine großen Abweichungen vom Mittel vorliegen. Wie schon bei den Sendedioden die Abstrahlung winkelabhängig ist, zeigt sich die optische Empfindlichkeit der Photodioden ebenfalls richtungsabhängig. Etwas unerwartet sind auch hier zwei Maxima des Photostromes in einer Richtung zu verzeichnen. Die Richtungen und Winkel sind genau wie in Kapitel 4.2 definiert, die Lage des Bauelementes entspricht genau der in Abb. 4.11 gezeigten Lage.

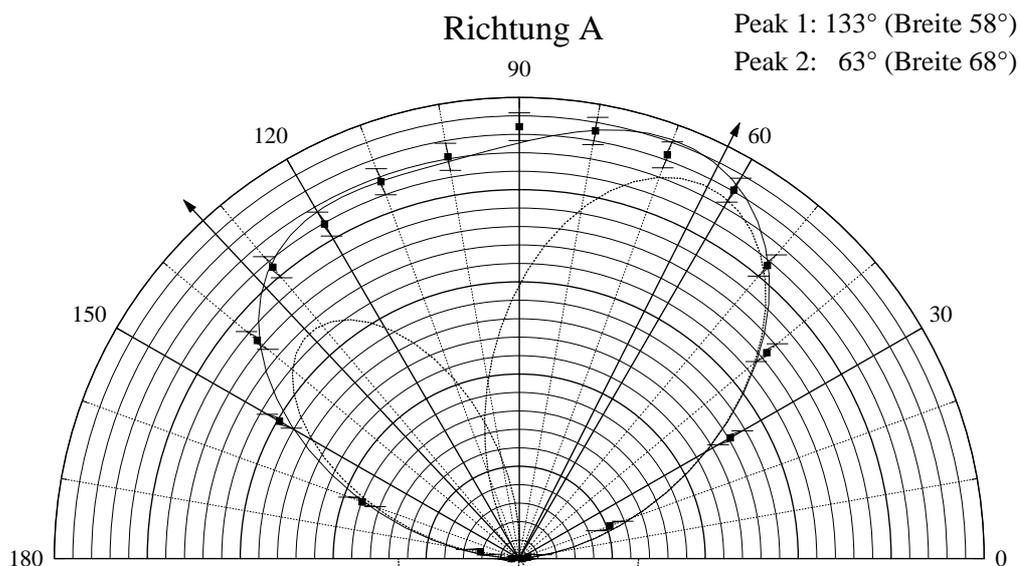


Abbildung 4.12: Winkelabhängigkeit des Photostroms einer Photodiode in Richtung A (siehe Text in Kapitel 4.2).

³Lagerung und Betrieb über je 1000 Stunden bei 125°C

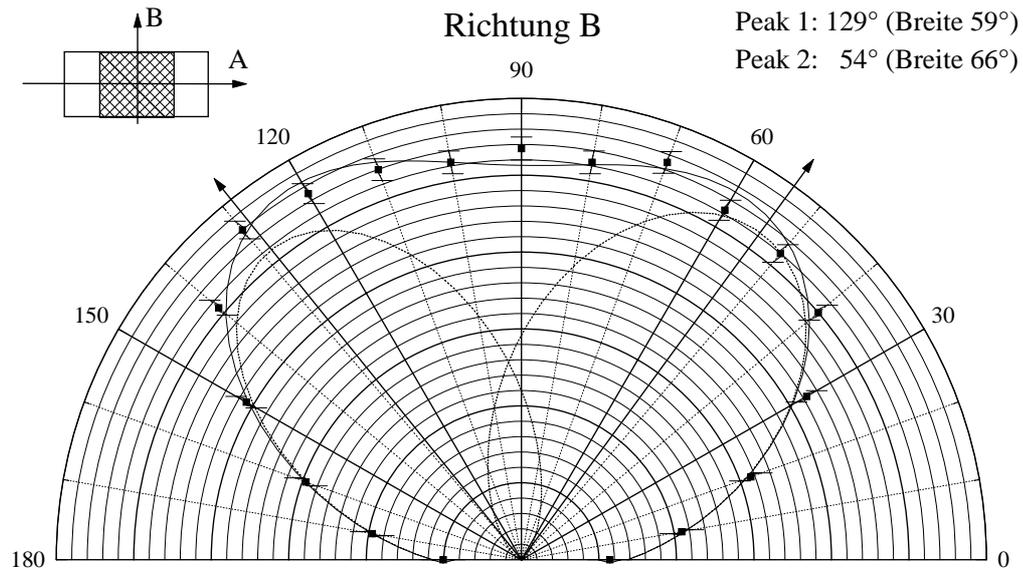


Abbildung 4.13: Winkelabhängigkeit des Photostroms einer Photodiode in Richtung B mit zwei, unterschiedlich stark ausgebildeten Maxima.

Die in der Abbildung eingezeichnete durchgezogene Linie stellt den besten Fit zweier Gauß-Kurvenzüge dar^[67]. Die beiden Konstituenten sind einzeln dünner und gestrichelt dargestellt. Die Lage der Peakmaxima (Pfeile in den Abbildungen 4.7, 4.8, 4.12 und 4.13) geben die Hauptempfindlichkeitsrichtungen an. Zwischen diesen beiden Extremstellen fällt der Photostrom um etwa 5 % vom Maximalwert ab. Auch diese Tatsache ist beim Aufbau einer Empfängerchiene zu beachten, denn je größer der gemessene Photostrom bei gleicher Einstrahlung ist, desto besser das Signal-Rausch-Verhältnis⁴. In der anderen Hauptachse (Richtung A) zeigt sich ein deutlich asymmetrisches Verhalten (Abbildung 4.12), der Empfängerchip ist nicht exakt mittig bezüglich dieser Achse, sondern näher an der Kathode angeordnet. Die beiden Maxima entsprechen genau dem Fall, daß die Vergußkante in der Sichtlinie zur Lichtquelle liegt und so besonders viel Licht auf den Empfängerchip gebeugt wird.

4.4 Glaskörper

Für den Aufbau einer Lichtschiene, die an eine zu überwachende Glascheibe angebracht werden kann, sind zwei verschiedene Auslegungen notwendig. Für mineralische Gläser (dies wird der Hauptanwendungsfall sein) muß eine Lichtschiene ausschließlich auf der Basis von mineralischem Glas und Metall entworfen werden, die Verwendung von Kunststoffen sollte wegen der stark unterschiedlichen thermischen Ausdehnungen auf kürzeste Strecken beschränkt werden. Anders verhält es sich bei organischen

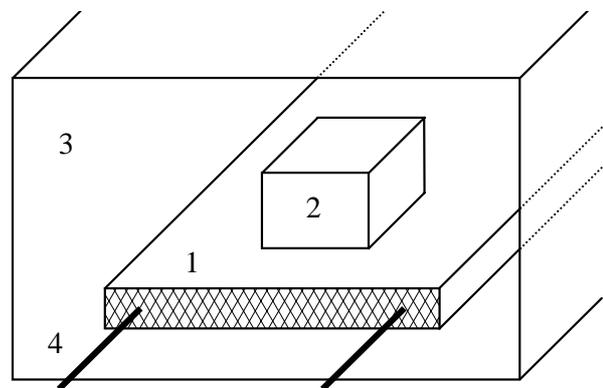


Abbildung 4.14: Prinzipskizze des inneren Aufbaus einer Lichtschiene auf Kunststoffbasis für organische Gläser

⁴SNR = Signal-Noise-Ratio

Gläsern (Acrylglas). Hier kann die Lichtschiene nur aus thermisch dem Acryl ähnlichen Kunststoffen aufgebaut werden, aus den gleichen Gründen wie zuvor. Die bisher von der OPTO-System GmbH hergestellte Lichtschiene besteht aus verschiedenen Kunststoffen und ist in der Abbildung 4.14 schematisch gezeigt. Auf einem dünnen Leiterplattenstreifen ① mit 4,5 mm Breite und beliebiger Länge sind SMD-LEDs ② aufgebracht. Diese bestückte Leiterplatte ist luftdicht in ein Acrylglaskörper ③ eingegossen oder -geklebt. Die elektrischen Anschlüsse ④ sind nach außen geführt. Der äußere Basiskörper ist eine U-Profil-Schiene aus undurchsichtigem Polyethylen. In dieses Profil wird die Lichtschiene (siehe Kapitel 4.1) eingesetzt, die Hohlräume mit Silikonkleber ausgefüllt und mit einem Acrylglasstreifen abgedeckt. So entsteht eine kompakte Lichtschiene, die durch die elastische Verklebung mit Silikon alle thermischen Differenzen ausgleichen kann^[57]. Für anorganische Gläser konnte auf keine bestehende Lichtschiene zurückgegriffen werden, es wurde im Rahmen dieser Arbeit ein komplett neuer Aufbau entwickelt. Erschwerend wirkt sich die Verwendung von Glas aus, das entgegen den Kunststoffen nur von sehr wenigen Spezialfirmen in entsprechende Form gebracht werden kann, eine sonst übliche Nachbearbeitung im Haus ist ausgeschlossen.

Die Abbildung 4.15 auf der Seite 42 zeigt mehrere Details des Sicherheitssystems im Zusammenhang. Oben dargestellt ist der Gesamtaufbau des Systems, angebracht an einem zu schützenden Glaskörper. An der Glasscheibe unten ist die Sendeschiene in entsprechender Ausführung (Kunststoff oder Glas/Metall) angeklebt, oben die komplementäre Empfängerschiene. In den Abbildungen darunter sind beide Lichtschienen in einer Querschnittszeichnung im Vergleich dargestellt. Links unten ist die Kunststoffprofilschiene im Detail zu sehen. Zusätzlich zur reinen Lichtschiene ist hier ein Stab mit prismatischem Querschnitt an die Schiene anzubringen, damit das Licht in der richtigen Richtung abgestrahlt und in die Scheibe eingekoppelt wird. Bei der im Bild rechts unten dargestellten Variante für mineralische Gläser ist ein Glasstab mit gezeigtem Querschnitt der Basiskörper. In diesen wird die Lichtschiene in eine Nut eingeklebt. Das ganze System wird zum mechanischen Schutz mit einem U-Profil aus Aluminium umgeben. Dieses System stellt die Lichtschiene dar, die mit einem entsprechenden Glasbinder an eine Fensterscheibe geklebt werden kann. Der Prototyp wurde in beiden Varianten aufgebaut, bei der Glas-Metall-Realisierung entspricht die Schiene aufgrund von Mindest-Liefermengen⁵ noch nicht den endgültigen Abmessungen.

4.5 Kleber

Die einzelnen Elemente der Lichtschienen müssen dauerhaft zusammengefügt werden. Dafür empfehlen sich besonders Kleber, da sie auch einen Abschluß zur Umwelt ermöglichen. Bei der Lichtschiene auf Kunststoffbasis wird Silikonkleber 5145 der Fa. Loctite bzw. *Novasil S10* der Fa. Otto Chemie verwendet. Diese härten durch Luftfeuchtigkeit über einen Zeitraum von 24 Stunden aus, und sind nach dieser Zeit noch elastisch. Damit sind Unterschiede in den thermischen Ausdehnungen ausgleichbar, die Klebefugen lassen sich um bis zu 45° scheren, ohne das die Klebefuge aufreißt. Möglich sind Klebespalte bis 1 mm, d.h. es können Materialien auf ein Meter Länge verklebt werden, bei denen der Unterschied der jeweiligen Ausdehnungskoeffizienten kleiner ist als $\Delta\alpha_{max} \approx 2 \cdot 10^{-5}$. Dies ergibt sich nach folgender Formel, wenn man für die Temperaturdifferenz ΔT das Intervall $[-30^\circ \dots +70^\circ]$, zwei Enden und die Dicke des Klebespaltes $\Delta l = 1$ mm annimmt:

$$\Delta\alpha_{max} = 2 \frac{\Delta l}{l} \cdot \frac{1}{\Delta T} = 2 \cdot 10^{-5} \quad (4.3)$$

⁵Der Lieferant hat eine Mindestlieferungsmenge von 1000 m Glasprofilstangen vorgegeben, die erst geordert werden können, wenn alle geometrischen Parameter sicher feststehen.

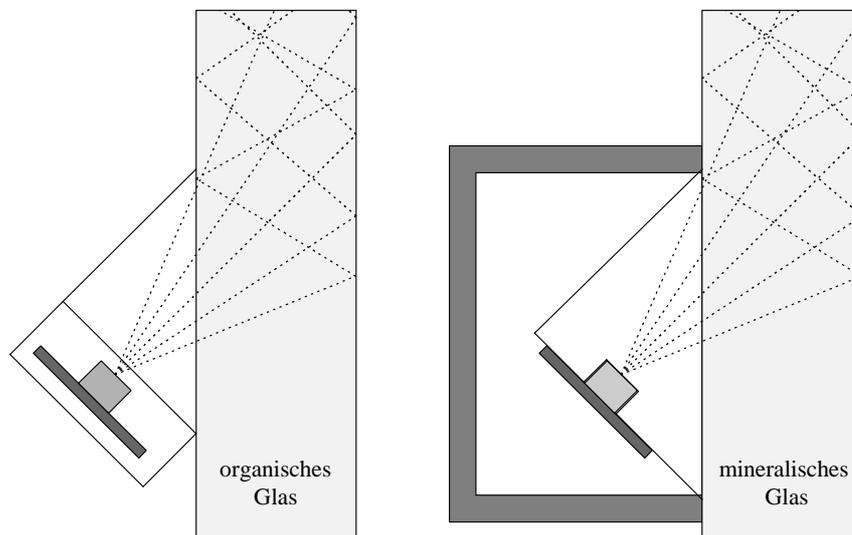
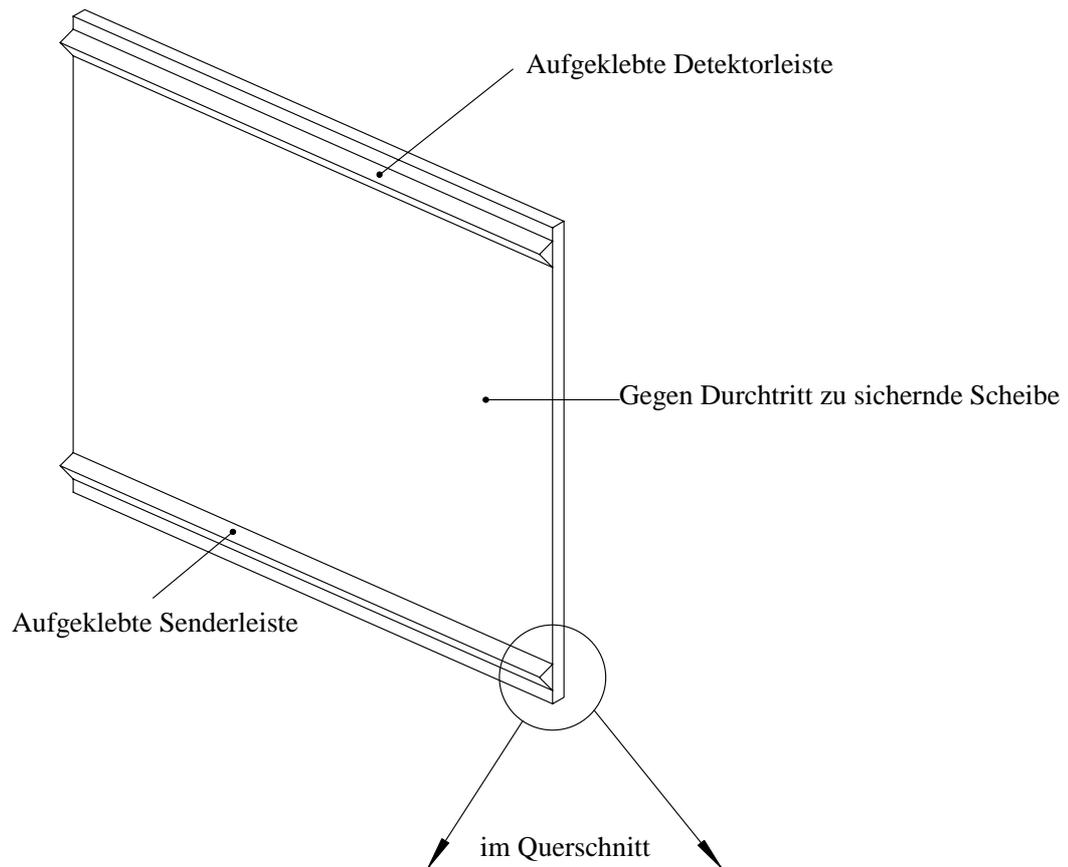


Abbildung 4.15: Oben ist der komplette mechanische Aufbau des optoelektronischen Sicherheitssystems skizziert. An einem Ende der Scheibe ist eine Sendeleiste und am gegenüberliegenden Ende eine Empfängerleiste angebracht. Die Leisten müssen nicht zwangsläufig oben und unten angebracht sein. Unten ist detaillierter im Querschnitt der Aufbau der Sende- bzw. Empfängerschiene dargestellt. Links der Aufbau für organische Gläser komplett aus Kunststoff, für mineralische Gläser (rechts) wird nur Glas und Aluminium (dunkles U-Profil) verwendet.

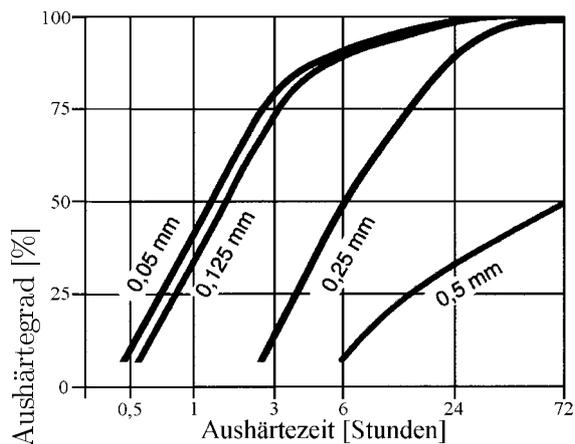


Abbildung 4.16: Aushärtegeschwindigkeit für verschiedene Spaltdicken bei 50% rel. Luftfeuchtigkeit und 23°C. Deutlich erkennt man, daß der 0,5 mm-Spalt nach drei Tagen Aushärtezeit erst die halbe Festigkeit besitzt. [58]

zweites *Modell* entwickelt werden. Für die Lichtschiene auf Glas/Metall-Basis sind die Verhältnisse deutlich schwieriger. Es kann nicht mehr ein pauschaler Kleber für alle Teile eingesetzt werden, für die verschiedenen Grenzflächen müssen auch verschiedene Kleber und damit auch Aushärtssysteme zum Einsatz kommen. Die nachfolgende Tabelle zeigt die auftretenden Grenzflächensysteme und die verwendeten Kleber.

Grenzfläche	Kleber	Aushärtung	Eigenschaft
Glas - Glas	<i>Loctite 350</i>	UV-Licht	glasklar, flüssig
Glas - Epoydharz	<i>Loctite 322</i>	UV-Licht	glasklar, dickflüssig
Glas - Aluminium	<i>DynaFlex 22</i>	Luftfeuchtigkeit	braun, zähflüssig
ABS - Epoxydharz	<i>Loctite 3106</i>	UV-Licht	glasklar, flüssig

Tabelle 4.2: Grenzflächen und -systeme und zu benutzende Kleber in der Lichtschiene-Variante für den Einsatz an mineralischen Gläser. Mit UV-Licht ist Licht im Wellenlängenbereich um $\lambda \leq 365$ nm gemeint, die Aushärtung durch Luftfeuchtigkeit beinhaltet eine ruhige Lagerung bei Raumtemperatur über einen Zeitraum von 24 Stunden. Siehe auch Anhang A.1

Die Aushärtung mit UV-Licht bringt einen produktionstechnisch wertvollen Zeitvorteil. Im Gegensatz zu den unter Luftfeuchtigkeit aushärtenden Klebern mit Härtezeiten im Bereich von Tagen, lassen sich mit den tabellierten Klebern bei geeigneter Bestrahlung Härtezeiten im Sekundenbereich realisieren. Die zusammengesetzten Teile sind dann mechanisch voll belastbar. Die folgende Graphik 4.17 zeigt die zeitliche Entwicklung einer flächigen Klebefuge, die von der Seite mit UV-Licht der Intensität $I = 100$ mW/cm² bestrahlt wird^[58]. Im fertigen System sollten alle Klebefugen optimale Haftung zeigen. Daher wurden in zahlreichen Versuchen in Rücksprache mit verschiedenen Herstellern der jeweils beste Kleber für eine Grenzfläche identifiziert und dann in Streßtest auf seine Grenzdaten hin untersucht. Die nachfolgende Liste zeigt die Untersuchungen, die zu den Ergebnissen in Tabelle 4.2 geführt haben.

^{||}Dieser Kleber ist von der Fa. Roda Chemie, Berlin vorgeschlagen worden. Tests mit diesem Material ergaben zufriedenstellendere Ergebnisse als mit einem Produkt von Loctite.

Bei solch großen Klebespalten ist allerdings zu beachten, daß die Aushärtegeschwindigkeit stark von der Spaltbreite abhängt. Die nebenstehende Graphik zeigt die Aushärtung für verschiedene Spalte zwischen 0,05 mm und 0,5 mm^[58]. Lichtschienen auf Basis von Kunststoffen werden mit farbigen LEDs bestückt seit nunmehr acht Jahren in Längen von einigen hundert Kilometern für Kantenbeleuchtung und Hinterleuchtung an organischen Gläsern (Acryl-Glas) eingesetzt und haben ihre Praxistauglichkeit gezeigt. Da die Unterschiede zwischen organischem Glas und mineralischem größer als die hier angegebene Grenze sind, muß ein

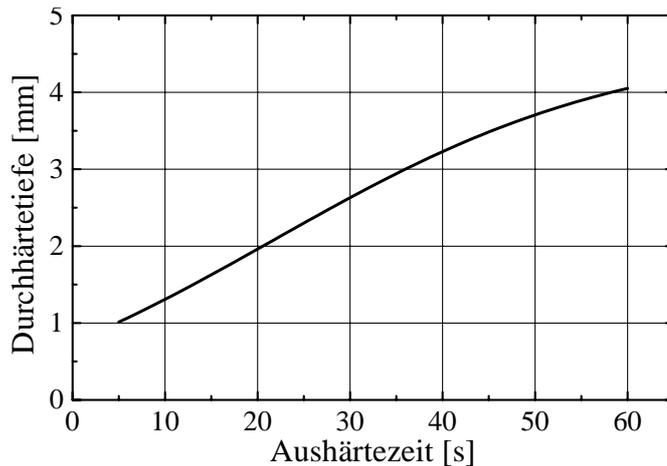


Abbildung 4.17: Zeitliche Entwicklung der Aushärtung einer Klebefuge mit *Loctite 322* bei Betrachtung mit UV-Licht der Wellenlänge $\lambda = 365$ nm und der Intensität $I = 100$ mW/cm². Quelle: [58], siehe auch Anhang A.1

- Glas — Glas

Die Verklebung von fettfreien Glasflächen flächig oder mit Stoßkanten aneinander läßt sich mit sogenanntem „Glasbonder“ einfach bewerkstelligen. Die Klebung ist so stabil, daß bei Dehnungsversuchen eher die Glasscheibe als die Klebefuge zerstört wird. Die ausgehärtete Klebefuge ist chemisch inert und läßt sich weder durch organische Lösemittel (Aceton, Alkohol, Benzin, ...) oder polare Mittel (Wasser) noch Säuren oder Laugen (Salzsäure (HCl), Schwefelsäure (H₂SO₄), Natronlauge (NaOH), Kalilauge (KOH), ...) verändern. Diese Beständigkeit gegen chemische Einflüsse war allen vollständig ausgehärteten Klebstoffsorten gemein und wird daher bei den folgenden nicht wiederholt erwähnt. Thermische Beständigkeit bis 120°C ist gegeben, Temperatur-Wechsel-Test wurden an diesem System nicht sehr intensiv verfolgt, da es sich um eine intermaterielle Verbindung mit einem sehr dünnen (>200 μm) Klebespalt handelt.

- Glas — Epoxydharz

Diese Grenzfläche tritt auf, wenn die auf dem Leiterplattenstreifen aufgebrauchten SMD-LEDs mit ihrem transparenten Verguß aus Epoxydharz auf das Abdeckglas der späteren Lichtschiene aufgeklebt werden, um das von den LEDs emittierte Licht optimal in das Glas einzukoppeln. Diese Verklebung stellt auch die größte Herausforderung dar, da ein ionisches Material (Glas) mit guter Haftung für einen polaren Kleber mit einem stark vernetzten Material mit chemisch inerte Oberfläche und damit schlechter Haftung für fast alles zu verbinden waren. Tatsächlich handelt es sich um keine mechanisch tragende Verbindung. Der letztlich gefundene Kleber ist relativ viskos und bildet daher einen etwas dickeren Klebespalt mit 150 - 300 μm Dicke aus. So können auch Positionierungenauigkeiten der SMD-LEDs ausgeglichen werden. Es wurde punktförmiger und flächiger Auftrag von Hand untersucht. Punktförmiger Auftrag zeigt bessere statische Abrißwerte (punktförmig: 2,1 kg/Diode, flächig: 1,6 kg/Diode). Vermutlich dampft beim flächigen Auftrag mehr Lösemittel vor dem Aufsetzen der Dioden ab, der Geruch war hier viel stärker. Auch im Hinblick auf MAK-Werte für diesen Kleber ist punktförmiger Auftrag vorzuziehen. Die Aushärtung erfolgte mit einer 500 Watt UV-Licht-Quelle bei einer Hauptemissionswellenlänge von $\lambda_{UV} = 365$ nm für 30 Sekunden, die theoretische Aushärtezeit laut Datenblatt beträgt unter 10 Sekunden. Die beiden Verklebearten wurden in einem Ultraschallbad für je 10 Minuten in Wasser, Alkohol, Aceton und Waschbenzin behandelt, es zeigten sich keinerlei Ausfälle oder Ablösungen. Für weitere Untersuchungen wurden die einzelnen Komponenten im Vorfeld vor allem thermisch charakterisiert, um eine Vorauswahl bei den Klebern und den Klebeparametern treffen zu können. Die thermische Ausdehnung ist der wichtigste Punkt, diese wurde für den Leiterplattenstreifen und das Glas bestimmt, um von schwankenden Herstellerangaben unabhängig

zu sein. Für Glas und für die verwendeten Leiterplattenstreifen aus FR4 und FR5 ergab sich folgende Werte (siehe dazu Abbildung 4.20 auf Seite 48):

$$\begin{aligned}\alpha_{Glas} &= 9,6 \cdot 10^{-6} \\ \alpha_{FR4} &= 29,4 \cdot 10^{-6} \\ \alpha_{FR5} &= 11,0 \cdot 10^{-6}\end{aligned}\tag{4.4}$$

Bei einem angenommenen maximalen Temperaturunterschied von 110 K (-30°C bis +80°C) und einer Länge der Systemkomponente von 0,5 m ergibt sich eine Längenänderung von ca. 120 μm über die ganze Länge und damit eine Längenänderung zwischen den einzel verklebten Dioden von 2,5 μm . Dies stellt theoretisch und auch in allen durchgeführten Temperaturwechseltest kein Problem dar. Für extreme Untersuchungen wurde diese Differenz noch sehr viel weiter erhöht: Die verklebten Komponenten wurden in flüssigem Stickstoff abgekühlt und anschließend mit kochendem Wasser übergossen (-196°C bis +100°C) Es ergab sich ein $\Delta T \approx 300$ K und damit eine Längenänderung von $\Delta l \approx 330 \mu\text{m}$. Es zeigten sich auch nach mehrmaliger Wiederholung keine Beeinträchtigungen der Verklebung (Prüfung mikroskopisch und durch Abrißtests).



Abbildung 4.18: Die Fotografie zeigt den Umwelttest für die Verklebung Glas – Metall nach etwa 20 Monaten. Die schwarzen Reststreifen auf der rechten Seite stammen von einem Kleber, der die Bedingungen unter freiem Himmel nicht überstanden hat, der Kleber links („Dynaflax 22“ der Fa. Roda Chemie, Berlin) hält weiterhin ein Aluminium U-Profil an der Scheibe.

- Glas — Aluminium

Hier konnte als Kleber „Dynaflax 22“ der Fa. Roda Chemie, Berlin als geeignet identifiziert werden. In der Untersuchung der Beständigkeit gegen die unterschiedlichsten Einflüsse (wie zuvor) wurde auch diese Verbindung mehreren Temperaturschocks mit $\Delta T \approx 300$ K und einem Temperaturwechseltest mit $\Delta T \approx 110$ K mit 30 Zyklen ausge-

setzt. Zusätzlich zu den Untersuchungen beim System „Glas-Leiterstreifen“ wurde hier zusätzlich nach jedem Zyklus eine mechanische Beanspruchung zum Lösen der Verbindung in heißem und kaltem Zustand durchgeführt. Nach vielen Versuchen mit Hammer und Meißel hat die zugrundeliegende Glasscheibe die Temperaturwechsel nicht mehr überstanden, die Verklebung hingegen zeigt sich von Allem unbeeinflusst. Die Alterung der Verklebung wird noch zur Zeit durchgeführt und beinhaltet eine Lagerung unter freiem Himmel seit Oktober 1998 (≈ 18.000 Stunden). In regelmäßigen Abständen wird die Klebestelle mit Lösemitteln, Säuren, Laugen, Hammer und Meißel bearbeitet. Die Glasoberfläche ist mittlerweile etwas stumpf geworden, die Klebung hält weiterhin ohne erkennbare Einbuße der Stabilität. Die Abbildung 4.18 auf Seite 45 zeigt eine Fotografie der Scheibe mit angeklebtem Profil aus Aluminium.

- ABS — Epoxydharz

Diese Grenzfläche tritt dort auf, wo auf eine SMD-LED der Sendeschiene und eine SMD-PD der Empfängerschiene eine Aufnahme geklebt wird, in die später die Referenzleitung in Form einer Kunststofflichtleitfaser eingesteckt/geklebt wird. Beide Materialien lassen sich relativ schlecht kleben, allerdings muß hier auch keine große mechanische Kraft aufgenommen werden. Die Untersuchung dieser Klebeverbindung erstreckte sich im wesentlichen auf Abrißtests und Temperatur-Wechsel-Tests mit wenigen Zyklen. Die Klebung wie die Materialien erwiesen sich als unempfindlich gegen nahezu allen aggressiven und reinigenden Flüssigkeiten, lediglich mit Dimethylformamid (DMF) bei 50°C über einige Tage ließen sich die Kunststoffe und die Klebefuge lösen, bei Behandlung mit warmem Aceton im Ultraschallbad wurden die Oberflächen stumpf.

4.6 Thermische Eigenschaften

Für die mechanische Stabilität spielen die thermische Ausdehnung eine ganz wesentliche Rolle, da die verwendeten Materialien sich in dieser Eigenschaft stark unterscheiden. Da keine verbindlichen Daten für den thermischen Ausdehnungskoeffizient existieren, wurden sie hier neu gemessen. Es steht ein Ofen zur Verfügung, mit dem Temperaturen zwischen -40°C und $+90^{\circ}\text{C}$ eingestellt und stabil gehalten werden können (siehe Kapitel 3.7 auf Seite 31). Da sich die Ausdehnung selbst bei sich stark ausdehnenden Materialien in der Größenordnung von einigen μm bewegt, konnte sie mit vorliegenden Mittel nicht direkt gemessen werden. Es wird das Prinzip des Kniehebels genutzt, um diese kleinen Längen in eine größere Ausdehnung zu transformieren. Ein biegsamer Stab des Materials wird im Ofen in eine Aufnahme aus Invar-Stahl^[51] ($\alpha_{Invar} \approx 5 \cdot 10^{-8} < \frac{1}{200} \alpha_{Stab}$) eingeklemmt. Sollte sich seine Ausdehnung unter Temperatureinfluß auch nur geringfügig ändern, würde sich der Stab stärker durchbiegen. Diese Änderung kann als Funktion der Temperatur gemessen werden und dann auf die lineare Längenänderung zurückgerechnet werden. Die Kurve, die ein eingespannter Stab beschreibt, folgt der sogenannten Kettenlinie^[54], eigentlich die Kurve eines frei hängenden, an den Enden eingespannten, schweren Seils. Beide Situationen sind mathematisch äquivalent^[59].

$$y = a \cosh(x/a) \tag{4.5}$$

Mit dem freien Parameter a kann man die Kurve dem konkreten Stab mit seiner Durchbiegung als Kettenlinie anpassen. Bestimmt man die Bogenlänge der angepaßten Funktion erhält man direkt die Länge des Stabes. Die Bogenlänge l einer stetigen Funktion $f(x)$ ergibt sich nach^[55]:

$$l = \int_{-x_0}^{+x_0} \sqrt{(f'(x))^2 + x^2} dx \tag{4.6}$$

Die Integralgrenzen $\pm x_0$ sind hier die Fixpunkte in der Aufnahme. Setzt man die Gleichung 4.5 ein, ergibt sich die Bogenlänge, bzw. die Stablänge l nach kurzer Rechnung:

$$l = 2a \sinh(x_0/a) \quad (4.7)$$

mit $x_0 = 0,2495$ m als halber Abstand der Fixpunkte des Stabes an den Klemmbacken der Aufnahme. Der Parameter a wird mit Hilfe der Berechnung eines Tabellenkalkulationsprogramms an die konkrete Durchbiegung des Stabes bei einer bestimmten Temperatur angepaßt, da die Gleichung 4.7 in a transzendent ist. Die gemessene

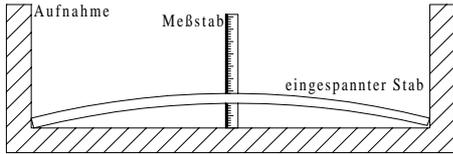


Abbildung 4.19: Prinzip der Messung der thermischen Ausdehnung

Höhe der Durchbiegung entspricht dem Minimum der Kettenlinie. Der Stab wurde allerdings so eingespannt, daß er sich nach oben durchbiegt, der Meßstab ließ sich so einfacher fixieren. Mathematisch macht dies keinen Unterschied. Die nebenstehende Abbildung 4.19 zeigt skizzenhaft das Prinzip der Messungen. Dieses Verfahren wurde für einen unbestückten Lichtschienen-Leiterplattenstreifen aus FR4 und FR5-Material und einen Plexiglasstab, mit

dem die Lichtschiene abgedeckt wird, durchgeführt. Abbildung 4.20 zeigt die lineare Abhängigkeit der Länge von der Temperatur für die Basismaterialien FR4 und FR5 im Vergleich. Der für die Vergleiche wichtige lineare Ausdehnungskoeffizient α beschreibt in erster Näherung die Länge des Stabes in Abhängigkeit von der Temperatur, diese Vereinfachung ist für die vorliegende Arbeit hinreichend genau.

$$l(T) = l_0(1 + \alpha T) \quad (4.8)$$

l_0 ist als die Länge des Stabes am absoluten Nullpunkt definiert. T ist hier die absolute Temperatur und in Kelvin anzugeben. Mit dieser Näherung ergibt sich aus der Steigung m einer Ausgleichsgeraden an die Meßpunkte der lineare Ausdehnungskoeffizient nach der Formel:

$$\alpha = m/l_0 \quad (4.9)$$

Der Abzissenabschnitt der Ausgleichsgeraden (bei $T \approx 0$) ist die Grundlänge l_0 des Stabes. Für einen Acrylglasstab ergibt sich ein etwa dreimal so großer Wert für den Ausdehnungskoeffizient wie für FR4 und ein mindestens achtmal so großer Wert wie für mineralisches Glas (Fensterglas = BK7). Abbildung 4.21 zeigt die Meßergebnisse und den bestimmten Koeffizient. Die stark unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten erklären die großen Probleme, die entstehen, wenn man Glas und Acrylglas über große Längen aneinander fügen möchte. Die Abbildung 4.22 zeigt die stark unterschiedliche Ausdehnung zweier Stäbe dieser beiden Materialien in Originalgröße. Die Stäbe wurden hier mit einer Länge von einem Meter bei Raumtemperatur ($\vartheta = 25^\circ\text{C}$) angenommen. Diese Situation ist in der Mitte dargestellt. Bei tiefen Temperaturen (oben in Abb. 4.22) zieht sich der Glasstab über die ganze Länge um etwa 0,2 mm zusammen (etwa halbe Strichstärke), die Länge des Acrylglasstabs verringert sich um 2,6 mm. Bei hohen Temperaturen (unten dargestellt) dehnt sich Glas um den gleichen Betrag von 0,2 mm aus, der Stab aus Acrylglas verlängert sich um 2,2 mm. Bei einer starren Verbindung würden starke Spannungen auftreten, die das Gefüge schnell zerstören^[2]. Eine elastische Klebeverbindung mit z.B. 1 mm Dicke, müßte Scherwinkel $\leq 45^\circ$ in vielen Zyklen verkraften können, ohne zu altern. Dies ist zur Zeit selbst mit den hochelastischen Silikonklebern schwierig zu erreichen ^{[77][78][58]}, eine so dicke Klebstoffschicht bietet auch nicht ausreichend Halt. Daher sind für die beiden verschiedenen Anwendungsfelder „Organische

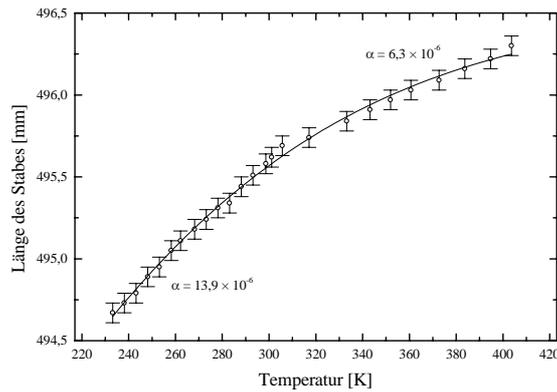


Abbildung 4.20: Thermische Ausdehnung eines FR4 Leiterplattenstreifens über dem Temperaturintervall $[-40^{\circ}\text{C}$ bis $+90^{\circ}\text{C}$]. Die gemessenen Längenänderungen, d.h. die Durchbringungen der Stäbe nach oben liegt im Bereich von wenigen Millimetern. Man erkennt einen nicht linearen Verlauf der Ausdehnung. Die Steigung entspricht dem Ausdehnungskoeffizient. Gerechnet wurde mit einem Mittelwert.

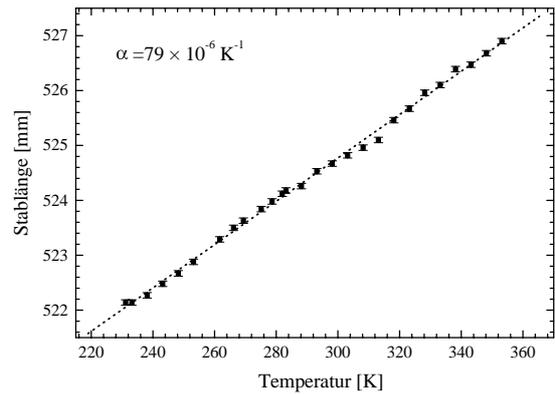


Abbildung 4.21: Thermische Ausdehnung eines Acrylglastabes im Temperaturintervall $[-40^{\circ}\text{C}$ bis $+85^{\circ}\text{C}$]. Der Stab hat sich von seiner geringsten Ausdehnung bis zur größten um etwas über zwei Zentimeter nach oben durchgebogen.

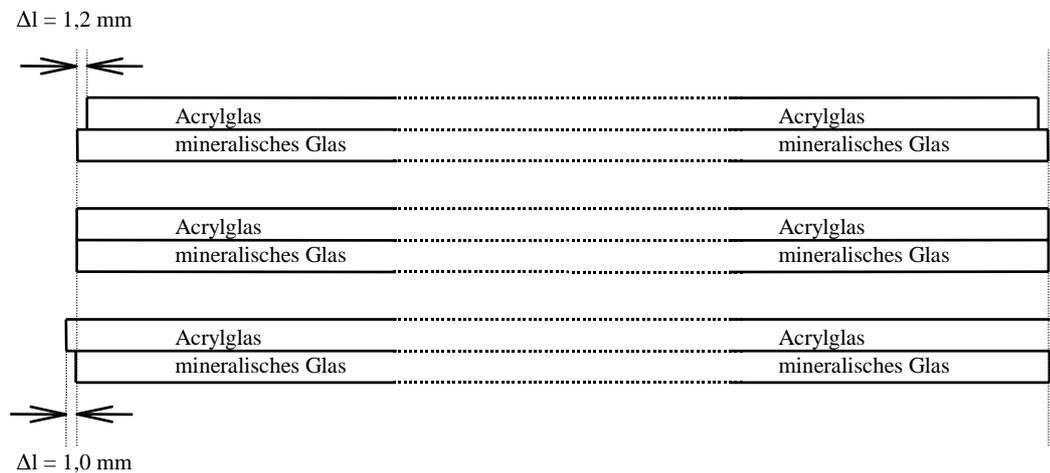


Abbildung 4.22: Thermische Ausdehnung zweier je einen Meter langen Stäbe aus Glas und Acrylglas zum Vergleich. Die Ausdehnungen sind in Originalgröße dargestellt.

Gläser“ und „Mineralische Gläser“ zwei verschiedene *Modelle* von Lichtschiene notwendig. Die Lichtschiene an organischen Gläsern besteht zwar aus sich stark unterschiedlich ausdehnenden Materialien, der Leiterstreifen ist aber im inneren des Kunststoffprofils nur an einem Ende befestigt, der Rest des Streifens kann sich frei bewegen. Hier erfolgte für dieses Projekt eine Weiterentwicklung im Vergleich zu dem im Kapitel 4.4 auf Seite 40 beschriebenen Aufbau, da sich das in größeren Mengen verwendete Silikon entgegen den Herstellerangaben^[25] als nicht essigsäurefrei erwies und bei Klima- und Temperaturbelastung die Leiterplattenstreifen korrodiert wurden. So wird der Leiterstreifen nun in ein Kunststoffprofil mit nur einem offenen Ende eingesetzt und dann mit einer Endkappe und Acrylkleber verschlossen. Diese Variante hat sich im Produktionsalltag sogar als preiswerter und in der Anwendung als wesentlich zuverlässiger erwiesen. Aspekte der thermischen Ausdehnung können so (wie auch Experimente gezeigt haben) vernachlässigt werden. Anders bei dem zweiten Modell: Die nachfolgenden Tabellen fassen zum einen die unterschiedlichen Materialien in ihren thermischen Eigenschaften zusammen und zeigen zum anderen die resultierenden Längenänderungen für die Lichtschiene für Anwendungen an mineralischen Gläsern:

Material	α	l_0 [mm]*	$\Delta l_{\Delta\vartheta_{min}=-40^\circ C}$ [mm]	$\Delta l_{\Delta\vartheta_{max}=+90^\circ C}$ [mm]
Glas	$9,6 \cdot 10^{-6}$	500	-0,312	+0,312
FR4	$29,1 \cdot 10^{-6}$	500	-0,946	+0,946
FR5	$11 \cdot 10^{-6}$	500	-0,358	+0,358
Acrylglas	$79 \cdot 10^{-6}$	500	-2,568	+2,568
Epoxydharz	$80 \cdot 10^{-6}$	2	-0,010	+0,010
Aluminium	$23 \cdot 10^{-6}$	500	-0,748	+0,748
ABS	$110 \cdot 10^{-6}$	2	-0,014	+0,014

Tabelle 4.3: Aufgelistet sind die thermischen Ausdehnungskoeffizienten der in der Lichtschiene für mineralische Gläser vorkommenden Materialien, ihre Länge im System l_0 und die bei maximalen Temperaturänderungen gegenüber Raumtemperatur ($+25^\circ C$) auftretenden Längenänderungen Δl . Zum Vergleich ist Acrylglas mit aufgeführt.

	Glas	FR4	FR5	Epoxyd-Alumi- harz	Alumi- nium	ABS
Glas	—	1,268	0,092	0,018	0,872	-
FR4	1,268	—	-	-	-	-
FR5	0,092	-	—	-	-	-
Epoxydharz	0,018 [†]	-	-	—	-	0,008
Aluminium	0,872	-	-	-	—	-
ABS	-	-	-	0,008 [‡]	-	—

Tabelle 4.4: Die Kreuztabelle zeigt die über das ganze Temperaturintervall auftretenden Längenunterschiede zweier in der fertigen Lichtschiene zusammengeklebten Komponenten. Es zeigt sich deutlich, daß z. B. FR4 als Leiterplattenmaterial keine Verwendung finden sollte, um Spannungen an den einzelnen SMD-LEDs zu vermeiden. Desweiteren wird erkennbar, daß die Verklebung Glas – Aluminium flexibel ausgeführt werden sollte.

Die Tabelle zeigt die wesentlichen Problemgrenzfächen. Verzichtet man auf FR4 als Leiterplattenbasismaterial zugunsten von FR5, so kann das Problem auf die lange Verklebung der Glasabdeckung mit dem abschließenden Profil aus Aluminium reduziert werden. Bei einer entspannten Verklebung bei Raumtemperatur muß die Klebefuge Längenunterschiede von über $\pm 0,4$ mm aufnehmen können. Bei einer Fugendicke von ungefähr einem Millimeter ist dies mit dem *Dynamic Flex 22* von Roda Chemie, Berlin auch bei einer Temperaturwechselbelastung leicht möglich^[22]. Es ergibt sich ein maximaler Scherwinkel von $\beta = \arctan(0,43 \text{ mm}/1 \text{ mm}) = 23^\circ$, der auch bei tiefen Temperaturen von diesem Kleber verkraftet werden kann. Ein weiterer Teil der Verspannung wird durch ein Durchbiegen des Aluminiumprofils aufgenommen. Der Glasstreifen ist ausreichend flexibel, um das aufzunehmen, im montierten Zustand spreizt sich die Klebefuge im zentralen Bereich der Lichtschiene um etwa 0,1 mm. Diese Versuche wurden allerdings bei erschwerteren Bedingungen mit flüssigem Stickstoff bei circa $-196^\circ C$ und kochendem Wasser bei etwa $+95^\circ C$ durchgeführt, so

*Längenangaben gerundet

[†]Die SMD-LEDs sind mit ihrem Verguß aus Epoxydharz mit den Abmaßen $1,6 \times 1,6 \text{ mm}^2$ auf die Glasscheibe geklebt.

[‡]Eine Hülse aus ABS zur späteren Aufnahme von Lichtleitkabeln wird auf den Verguß einer Sende- und Empfänger-SMD-LED geklebt.

daß Fugendehnungen stärker sichtbar und meßbar wurden.

Das System muß auch bei Vibration bzw. Erschütterungen einsatzbereit und sicher bleiben. Daher wurde der gesamte Aufbau mit Elektronik zum einen von Hand in Schwingung unterschiedlicher Amplitude und Frequenz versetzt. Selbst schnellstmögliches Schütteln um 20 cm mit etwa 5 Hz brachte keine Beeinträchtigung der Funktion. Um starke Erschütterungen zu simulieren wurde das arbeitende System aus verschiedenen Höhen auf eine Kunststoffoberfläche fallen gelassen. Die Höhe betrug allerdings nie mehr als 10 cm, da sonst die Gefahr bestünde, die zu schützende Scheibe zu zerstören. Auch bei diesen Versuchen gab es keine Beeinträchtigung der Funktion. Entgeltige Aussagen zur Zuverlässigkeit können diese Handversuche allerdings nicht vorwegnehmen, sie müssen an unter Serienbedingungen gefertigten Systemen mit präzisen Rüttlern und Schocktestern nach VdS-Richtlinien durchgeführt und bestanden werden. Die Handversuche haben allerdings gezeigt, dass das im wesentlichen durch Klebstoffe gefügte System auch unter harten Einsatzbedingungen einschränkungsfrei funktionieren kann.

Kapitel 5

Elektronik

5.1 Gesamtübersicht

Für das System werden zwei elektronische Hauptkomponenten benötigt, zum einen eine Sendeeinheit, die die Lichtsendeschiene ansteuert, zum anderen ein Empfangs- und Auswertelektronik, die das alarmrelevante Signal aus dem empfangenen Licht selektieren muß. Die folgende Abbildung 5.1 zeigt den gesamten Aufbau des Sicherheitssystems als Blockschaltbild.

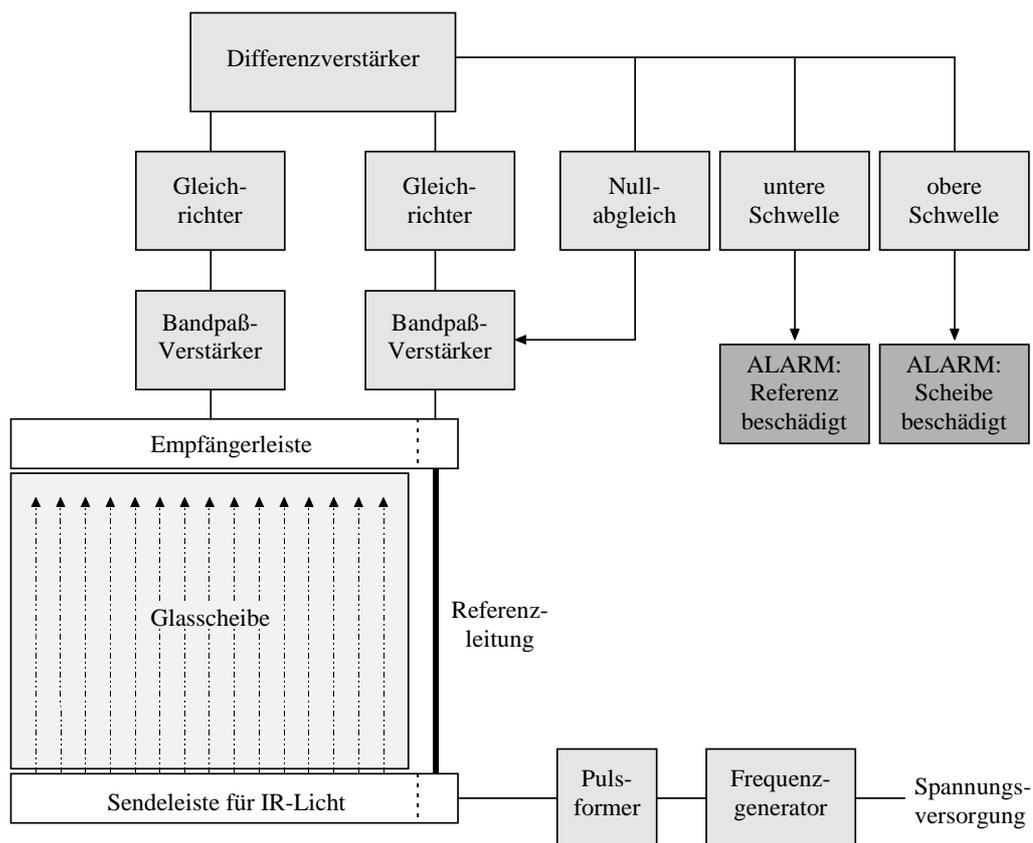


Abbildung 5.1: Blockschaltbild der Elektronik des Sicherheitssystems. Die Spannungsversorgung erfolgt durch 12 V Gleichspannung, die von einer Alarmzentrale geliefert werden, die Alarmer sind als geschlossene Schalter ausgelegt, die im Alarmfall geöffnet werden. Die einzelnen Komponenten sind im Text näher erläutert.

Läuft das eingekoppelte Licht durch die Glasscheibe, wird es am anderen Ende detektiert.

Wird die Scheibe jedoch angeritzt, beschädigt oder zerstört, so tritt das IR-Licht aus der Scheibe aus und kann nicht mehr detektiert werden. Am Detektor fällt die Intensität unter eine durch die Elektronik vorgegebene Intensität ab und der Alarm wird ausgelöst. Die Eindeutigkeit des Alarmfalles kann durch äußere Lichtquellen beeinflusst werden. Daher wird das Sendesignal nicht als kontinuierliches Licht, sondern in Form kurzer Pulse mit höherer Frequenz eingekoppelt. Eine Ansteuerlektronik mit Frequenzgenerator erzeugt das notwendige Signal zum Betreiben der Infrarotdioden auf der Sendeleiste. Dies hat zum einen den Vorteil, daß die Leistungsaufnahme deutlich verringert wird, zum anderen kann bei den Empfängerdioden durch einen nachgeschalteten Bandpaßfilter Untergrund effektiv vom eigentlichen, sicherheitsrelevanten Signal abgekoppelt werden. Dadurch wird eventuell von außen in die Scheibe eindringendes Streu- und Störlicht sowohl von konstanten äußeren Lichtquellen (Straßenlaternen, Schaufensterbeleuchtung, . . .) als auch von langsam veränderlichen Lichtquellen (Autoscheinwerfer, Taschenlampen, . . .) nicht in die Auswertung mit einbezogen. Um auch relativ schnellveränderliche Störeinflüsse von Außen auszuschalten, wurde die Pulsfolgefrequenz des eingespeisten Lichtes zu ungefähr 10 kHz gewählt. Bei der Wahl der Frequenz wurde darauf geachtet, daß keine höheren Harmonischen des Netzbrummen von 50 Hz gewählt wurden. Desweiteren wurden Frequenzen des Ultralangwellensendens und anderer technischer Anwendungen beachtet, um Überlagerungen und damit Störsignale, die den Frequenzfilter passieren und die Auswertung beeinflussen könnten zu vermeiden. Bei der Wahl muß das Frequenzspektrum von Lichtpulse (Fotoblitze, Gewitter) beachtet werden (s.u.). Nachdem durch den Bandpaßfilter alle niederfrequenten respektive konstanten und hochfrequenten Anteile abgetrennt sind, kann mit einem Gleichrichter die Amplitude der Pulse bestimmt werden. Die Amplitude des Lichtes, das durch die Scheibe geht, wird mit der Amplitude des Lichtes durch die Referenzleitung verglichen. Das Resultat dient zum einen dazu, die Verstärkung sehr langsam (im Sekundenbereich) so zu verändern, daß beide Signale gleich groß sind, ihre Differenz also Null ist. Damit sind langsame Veränderungen des System (thermische Drift, Verschmutzung der Scheibe, . . .) nicht mehr alarmrelevant. Einzig schnelle Veränderungen in den Amplituden sind das ausschlaggebende Signal für den Alarm. Fällt die Amplitude unter einen einstellbaren Schwellwert, so ist davon auszugehen, daß Licht aus der Scheibe ausgekoppelt wird, d.h. die Scheibe wird entweder beschädigt (Glasschneider oder grobe Risse im Glas) oder zerstört (Loch oder vollständig). Es wird Alarm gegeben. Es ist denkbar, daß ein potentieller Eindringling die Art der Anlage erkennt und eine IR-Lichtquelle an die Oberkante der Scheibe von außen anklebt, um beim Zerschlagen der Scheibe bei den Empfängerdioden kein Abfall des Lichtsignals entstehen zu lassen und damit ein Alarmgeben zu verhindern. Dies ist durch die Taktung des IR-Lichtes ausgeschlossen, da konstante Anteile des Meßsignals ignoriert werden. Selbst wenn ein Einbrecher an der Unterkante der Scheibe mit einem Empfänger das IR-Lichtsignal aufnimmt, verstärkt und an der Oberkante wieder einspeist, so wird die Empfängerelektronik einen Anstieg des Signals messen, obwohl die Referenz konstant bleibt. Ab einem einzustellenden Grenzwert wird auch in diesem Fall Alarm gegeben. Selbst wenn versucht wird, das Licht außen über eine Glasfaser an die Empfängereinheit zu bringen und so über das Fehlen der Scheibe hinweg zu täuschen, wird Alarm gegeben, weil das gemessenen Signal ansteigt, da eine Glasfaser weit weniger Absorption zeigt, als gewöhnliches Fensterglas. Die Differenz zwischen dem via Referenzleitung und Glasscheibe empfangenen Signal kann beim Anbringen der Alarmanlage sehr gut auf Null geregelt werden. So gehen die ganz spezifischen Eigenschaften des konkreten Glases, die die Absorption bestimmen, mit ein. Diese als Einbrecher nachzustellen, ist ausgeschlossen. Jede Abweichung des Signals nach oben oder unten über einzustellende Schwellwerte gibt Alarm. Im Laufe der Zeit kann sich die Absorptionseigenschaft der Scheibe durch Verschmutzung oder aufgeklebte Werbeschriften verändern. Daher wird, wie im Blockschaltbild durch den „Nullabgleich“ gezeigt, im normalen Betrieb die Differenz zwischen Signal und Referenz ständig durch Variation der Verstärkung im Signalpfad auf Null eingeregelt. Um dadurch kein Alarmsignal „wegzuregeln“ wurde eine

im Vergleich zu den Prozessen, die beim Glasbruch ablaufen, lange Zeitkonstante für den Abgleich gewählt. Sie beträgt in der jetzigen Entwicklungsstufe der Schaltung $\tau \approx 9,0$ s.

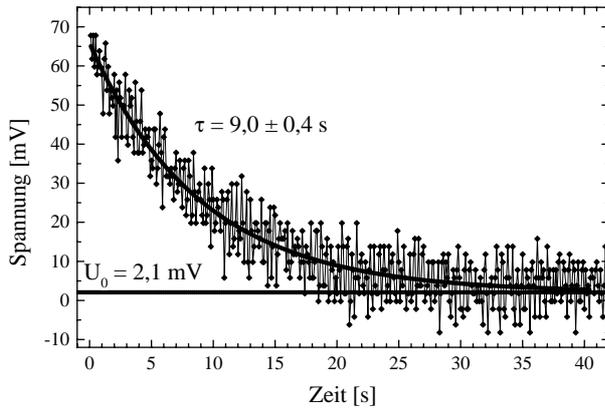


Abbildung 5.2: Im zeitlichen Verlauf der Differenzspannung zwischen Signal und Referenz sieht man deutlich den Nullabgleich. Mit einer Zeitkonstante von $\tau \approx 9,0$ s wird das Nutzsignal im Rahmen der Meßgenauigkeit auf Null geregelt, die Restspannung $U_0 = 2,1$ mV ergibt sich ebenso wie τ aus den optimalen Fitparameter für eine Exponentialfunktion nach Gl. 5.1.

über das Differenzsignal nach unendlicher langer Zeit und gibt an, wie gut die Schaltung auf eine Spannung $U_0 = 0$ V einregelt oder ein konstanter Offset vorhanden ist. Im vorliegenden Fall wird bis auf die Meßgenauigkeit von einigen mV auf Null geregelt, dies ist sehr akzeptabel. Dadurch können bei gleich hoher Sicherheit vor Fehlalarmen die Schwellwerte empfindlicher, d.h. niedriger angesetzt werden. Es kann schon Alarm ausgelöst werden, wenn versucht wird, Licht aus der Scheibe auszukoppeln, um den optischen Weg durch die Scheibe, wie beschrieben zu überbrücken. Das Signalrauschen ist nicht durch die Schaltung gegeben, sondern es entsteht in den Zuleitungen zum Oszilloskop, die gegen die starken am Laborplatz vorhandenen Störungen (siehe Kapitel 3.6) nicht ausreichend abgeschirmt sind.

5.2 Bandpaßverstärker

Das Signallicht durch die Glasscheibe wird in der Empfängerlichtschiene in ein elektrisches Signal umgewandelt. Sie besteht aus parallel geschalteten Photodioden, ihr Aufbau wird in Kapitel 4.3 beschrieben. Der geringe Strom der Photodioden, der durch das eingestrahelte Licht generiert wird, liegt im Bereich von einigen pA und muß daher gut und sicher verstärkt werden. Gleichzeitig wird bei der hier verwendeten Schaltung mit einem Bandpaßfilter nur der Signalanteil mit der Frequenz des eingestrahelten

In der nebenstehenden Abbildung ist zeitaufgelöst das Differenzsignal bei konstant gehaltenem Signal- und Referenzeingang dargestellt. Deutlich ist zu sehen, wie das Mischsignal langsam gegen Null geht. An den Kurvenverlauf wurde eine einfache Exponentialfunktion angepaßt (durchgezogene Linie) und aus den optimal an die Meßwerte angepaßten Parametern die Zeitkonstante übernommen.

$$U(t) = U_0 + Ae^{\frac{(x-x_0)}{\tau}} \quad (5.1)$$

Die Funktion enthält vier freie Parameter, wobei die Ursprungsverschiebung t_0 mit dem Startzeitpunkt der Meßwerte ($t = 0$) gleichgesetzt wird. Der Wert des konstanten Untergrundes U_0 gibt Auskunft

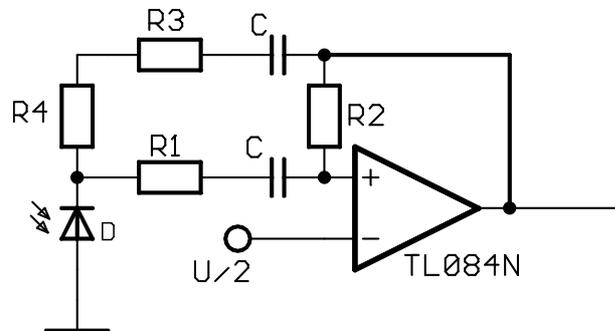


Abbildung 5.3: Elektrischer Aufbau des Bandpaßfilters für den Empfangsverstärker.

Lichtes verstärkt. Diese ist durch die Treiberelektronik vorgegeben. Die Dimensionierung der Empfängerschaltung muß sich bei ihrer Berechnung an den lieferbaren Widerständen und Kondensatoren orientieren, die Paßfrequenz sollte möglichst dicht an der Grundfrequenz liegen, die Bandbreite bzw. die Güte der Schaltung muß den Toleranzen der Bauelemente angepaßt sein, damit auch bei ungünstigster Abweichung der Bauelemente das Nutzsignal noch gut verstärkt wird. Für die Widerstände stehen viele verschiedene Werte nach der Norm-Reihe E 96 mit 1 % Toleranz zur Verfügung (siehe Anhang A.2 auf Seite 88). E 96 bedeutet, daß jede Dekade logarithmisch in 96 Werte unterteilt ist. Damit ist eine gute Übereinstimmung mit den berechneten Werten zu erreichen. Problematisch sind die Werte für Kondensatoren mit bestenfalls 10 % (bei einigen teuren Spezialfirmen mit 5 %) Toleranz. Da Kondensatoren auch nur mit wenigen Werten nach der E 6-Reihe (sechs verschiedene Werte pro Dekade, siehe S. 88) angeboten werden, wurden bei den Berechnungen die Kondensatoren in ihren Werten vorgegeben. Die Abbildung 5.3 zeigt den elektrischen Aufbau der Schaltung, im Anschluß sind in Gleichung 5.2 bis 5.5 die wesentlichen Formeln zur Berechnung des Filters angegeben. Bei der Schaltung ist dieser Filterbaustein zweimal mit identischem Aufbau vorhanden, einmal für die Verstärkung des Signals durch die Scheibe, zum anderen zur Verstärkung des Referenzsignals durch ein Lichtleitkabel. Die Werte der Kondensatoren sind mit $C = 1$ nF vorab festgelegt worden, die Größen Resonanzfrequenz f_0 , Verstärkung v_r (bei f_0), Güte Q und Bandbreite B charakterisieren die Schaltung. Sie lassen sich aus den Bauteiledaten nach folgenden Formeln^[75] berechnen (Bezeichnungen wie in Abb. 5.3).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi C} \sqrt{\frac{R_1 + R_3}{R_1 R_2 R_3}} \quad (5.2)$$

$$v_r = \frac{R_2}{2R_1} \quad (5.3)$$

$$Q = \pi R_2 C v_0 \quad (5.4)$$

$$B = \frac{1}{\pi R_2 C} = \frac{f_0}{Q} \quad (5.5)$$

Die Vorgabe der elektrischen Eigenschaften und des Wertes der Kondensatoren zu $C = 1$ nF determiniert die Werte aller anderen Widerstände. Als Resonanzfrequenz wurde die Frequenz $f_0 = 8.192$ Hz gewählt, es stehen preiswerte und miniaturisierte Uhrenquarze mit $4f_0 = 32.768$ Hz = 2^{15} Hz zur Verfügung. Dieses Frequenz liegt auch außerhalb des Frequenzspektrums von Fotoblitzern (Dauer 2,2 bis 0,7 ns^[8]) und Gewitterblitzen (≈ 100 μ s, Repititionsrate ≈ 100 ms^[9]) Nachfolgend sind alle Werte der Schaltung zusammengefaßt.

$$\begin{array}{ll} f_0 = 8192 \text{ Hz} & C = 1 \text{ nF} \\ v_r = 20 & R_1 = 20 \text{ k}\Omega \\ Q = 20 & R_2 = 820 \text{ k}\Omega \\ B = 410 \text{ Hz} & R_3 = 499 \text{ }\Omega \end{array} \quad (5.6)$$

Die Güte legt die Größe der Resonanzüberhöhung fest. Die Abbildung 5.4 zeigt das Frequenzbild der Filterschaltung, d.h. die Responsefunktion der Schaltung bei Frequenzen zwischen 500 Hz und 12.500 Hz.

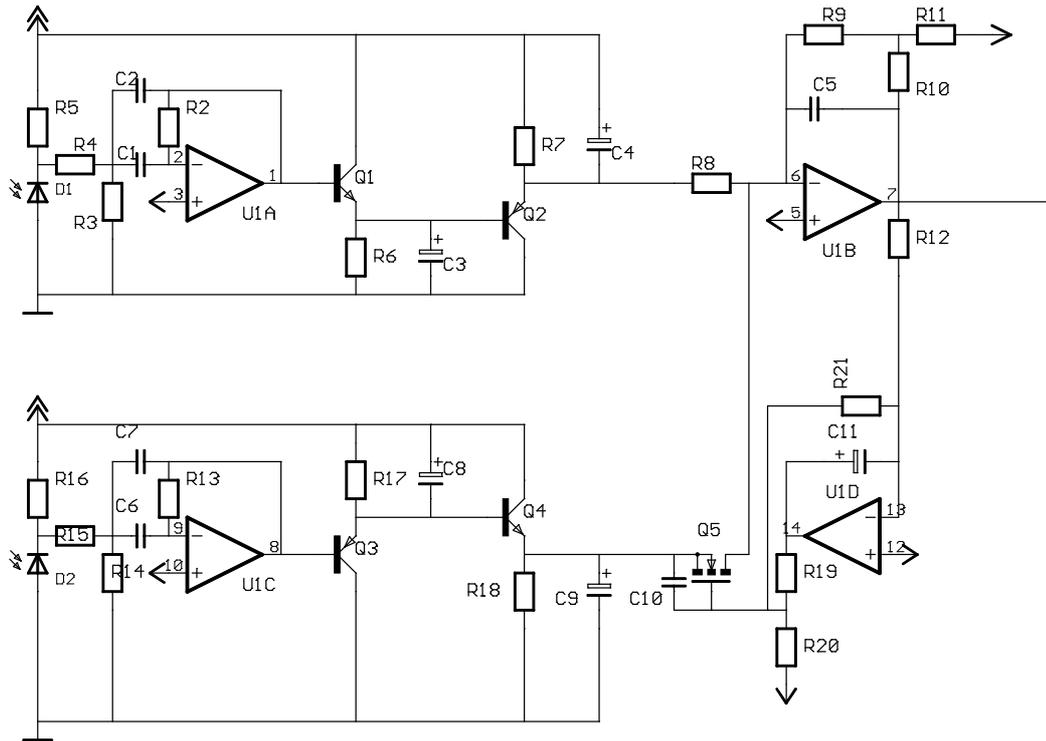


Abbildung 5.5: Der elektrische Aufbau des Komparators mit Drift kompensation ist hier dargestellt. Die Operationsverstärker (OPV) U1A und U1C sind die beiden Bandpaßfilter (wie in Abschnitt 5.2 beschrieben, die Bezeichnungen der Bauelemente können im einzelnen von denen in Abb. 5.3 abweichen) für das Signal und die Referenz. Am OPV U1B werden die beiden gleichgerichteten Signale voneinander abgezogen und nur die Differenz verstärkt.

Diese Bedingung wurde eingehalten durch Wahl der Widerstände zu:

$$\begin{aligned}
 R_8 &= 270 \text{ k}\Omega & R_9 &= 820 \text{ k}\Omega \\
 R_{10} &= 20 \text{ k}\Omega & R_{11} &= 499 \text{ }\Omega
 \end{aligned}
 \tag{5.8}$$

5.4 Alarmgeber

Mit der im letzten Abschnitt vorgestellten Schaltung wird das Signal durch die Scheibe mit dem Referenzsignal verglichen. Abweichungen beider Signale voneinander werden mit einer sehr langsamen Zeitkonstante (siehe Abb. 5.2) ausgeglichen, so daß Verschmutzung der Scheibe oder andere langsam veränderliche Störeinflüsse nicht zum Alarm führen. Demgegenüber sollen aber alarmrelevante Signale klar erkannt und richtig ausgewertet werden. Dazu werden dem Teil der Schaltung aus Abbildung 5.5 zwei Schwellwertverstärker nachgeschaltet. Sollte die Differenz kurzzeitig im positiven oder negativen größer als ein elektronisch voreingestellter Wert sein, so wird den nachgeschalteten FlipFlops ein Schaltimpuls gegeben, dies ist das Alarmsignal. Es können für die Schwellen im positiven und negativen unterschiedliche Werte eingestellt werden. So ist es möglich z.B. für Verlust von Licht aus der Scheibe eine viel niedrigere Schwelle einzustellen als für den Fall, daß Licht in die Scheibe eingekoppelt wird. Z. B. ist es mit einigem Justageaufwand möglich, Laserlicht direkt auf einen der Detektoren zu lenken, als Versuch, das System zu blenden. Die Schwellen sind mit den vorgestellten Widerstandswerten so eingestellt, daß eine Veränderung des Lichtes durch die Scheibe von mehr als 3 ppm Alarm auslöst. Ob diese Schwellen noch weiter herabgesetzt werden können

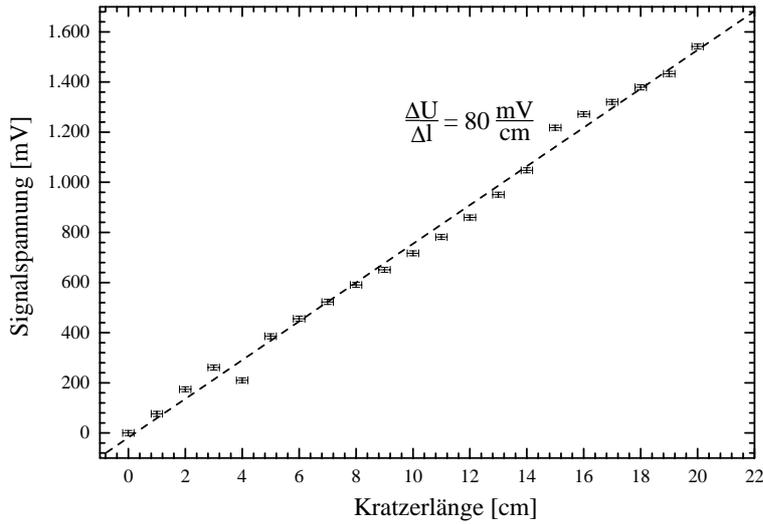


Abbildung 5.6: Im Laborexperiment wurde auf eine mit dem System bestückte Glasscheibe von 50 cm Breite Kratzer definierter Länge aufgebracht und die sich hinter dem Komparator ergebene Spannung gemessen. Um statisch und damit genauer messen zu können, wurde der Nullabgleich für diese Messung auf eine große Zeitkonstante ($\tau \approx \infty$) gesetzt.

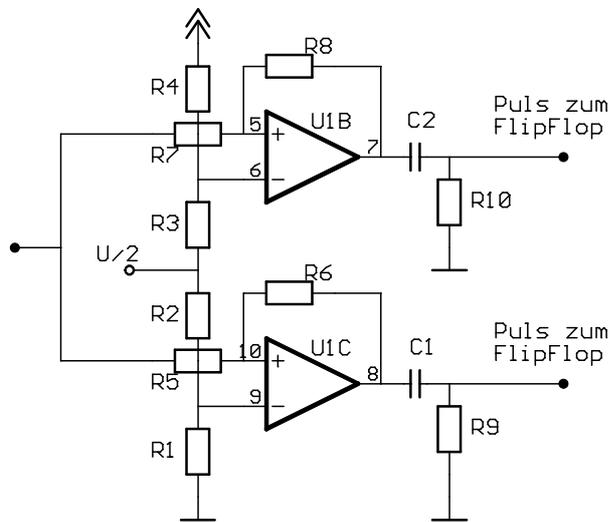


Abbildung 5.7: Elektrischer Aufbau des Schwellwerttriggers. Sollte das Signal in der positiven Richtung über die durch die Wahl der Widerstände nach Gleichung 5.10 hier eingestellte Schwelle von 140 mV gehen, gibt der obere Zweig der Schaltung einen Puls weiter. Unterschreitet das Signal die untere Schwelle (ebenfalls 140 mV) so gibt der untere Zweig einen Puls ab.

oder müssen muß der Einsatz des Prototyps zeigen. In der Abbildung 5.6 sind Ergebnisse einer Messung am Laboraufbau mit einer Glasscheibe und 50 cm Lichtweg durch die Scheibe dargestellt. Als Signalspannung aufgetragen ist das Signal hinter dem Komparator bei praktisch ausgeschalteter Nullregelung, um die Spannungen statisch messen zu können. Aus der Steigung der angepaßten Gerade kann man eine Empfindlichkeit der Schaltung von 80 mV Signalspannung pro cm Kratzer in der Scheibe ablesen. Als Grenze für das Auslösen eines Alarms wurden etwa 2 cm vorgegeben. Die daraus folgenden Schwellspannungen werden mit Spannungsteilern eingestellt, die hier von den Widerständen $R_1 \dots R_4$ gebildet werden. Die obere (U_+) und untere Schwellspannung (U_-) berechnen sich nach folgenden Beziehungen:

$$\begin{aligned}
 U_+ &= \frac{U}{2} \left(1 + \frac{R_3}{R_3+R_4} \right) \\
 U_- &= \frac{U}{2} \left(1 - \frac{R_2}{R_1+R_2} \right)
 \end{aligned}
 \tag{5.9}$$

Mit den im folgenden aufgelisteten Widerstandswerten ergeben sich die Schwellspannungen:

$$U_{\pm} = \frac{U}{2} \pm 140 \text{ mV} \quad \text{mit} \quad \begin{array}{ll} R_1 = 820 \text{ k}\Omega & R_2 = 20 \text{ k}\Omega \\ R_3 = 20 \text{ k}\Omega & R_4 = 820 \text{ k}\Omega \end{array}
 \tag{5.10}$$

5.5 Gesamtempfängerschaltung

Nachdem alle Teilkomponenten der Schaltung vorgestellt wurden, muß das Zusammenspiel für ein einwandfreies Funktionieren des Sicherheitssystems unter allen Umständen gewährleistet sein. Die Abbildung 5.11 auf Seite 61 zeigt die gesamte Schaltung mit den einzelnen Bauelementen und IC-Bausteinen. Die Anordnung der Operationsverstärker gibt den Aufbau nach dem Blockschaltbild (Abb. 5.1) wider. Die Bezeichnungen entsprechen den in den einzelnen Kapiteln verwendeten Namen. Ein wesentlicher Punkt für die Praxistauglichkeit ist die Störfestigkeit gegen alle möglichen elektrischen und elektromagnetischen Einflüsse von außen, die über die Versorgungs- und Signalleitungen oder über das umgebene Gehäuse kommen können. Für die Abschirmung von hoch- und niederfrequenten Störungen der Spannungsversorgung werden direkt vor der Schaltung Elektrolytkondensatoren zwischen +12 V und die Erdung geschaltet. Damit sind niederfrequente Störungen, wie z.B. das 50 Hz-Brummen oder Netzschwankungen im ms-Bereich abgeschirmt. Hochfrequente Störungen, wie sie z.B. als Ein- und Ausschaltpeaks von Induktivitäten entstehen können, haben Amplituden im Volt-Bereich und ein Frequenzspektrum bis zur Meßgrenze dieser Arbeit von 1 GHz und darüber hinaus. Für die erfolgreiche Schirmung solcher Spitzen wurden auf der Platine möglichst nah an die Versorgungspins der Operationsverstärker Keramikcondensatoren angeordnet. In der Gesamtschaltung sind diese durch Kondensatoren mit einer gerundeten Platte dargestellt. Durch diese doppelte Blockung werden Störfrequenzen von 10 Hz bis 1 GHz erfolgreich unterdrückt.

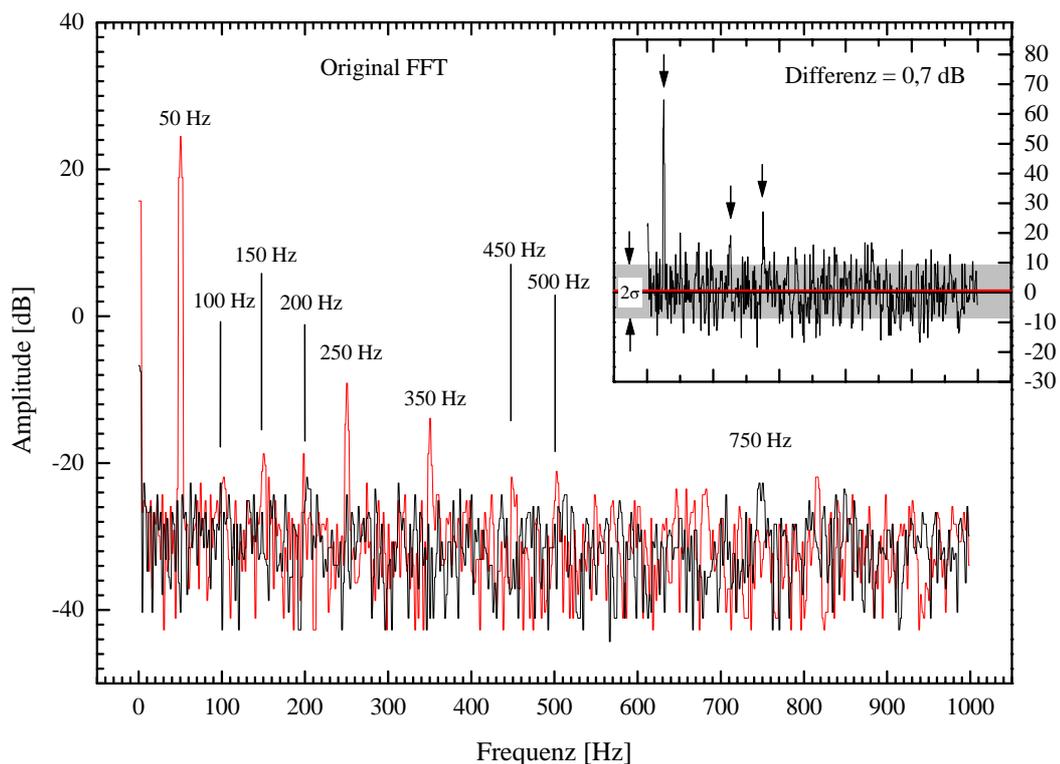


Abbildung 5.8: Die Abbildung zeigt Messungen der Versorgungsspannung ohne (Kurve mit Peaks) und mit einem Elektrolytkondensator zwischen den Anschlußpins mit einer Kapazität von $1000 \mu\text{F}$. In der Darstellung der Differenz beider Fourieranalysen (im Einschub oben-rechts dargestellt) sieht man deutlich, daß das 50 Hz-Brummen um 65 dB reduziert wurde (entspricht $1/8200$ stel, $5 \text{ dB} = \text{Faktor } 2$), ebenso wie die höheren Harmonischen bei 100 Hz bis 500 Hz

Die Abbildung 5.8 zeigt das Dämpfungsverhalten des Elektrolytkondensators. Es ist das Fre-

quenzspektrum der ungedämpften und der geblockten Versorgungsspannung dargestellt. Im ungedämpften Fall erkennt man besonders starke Peaks bei der Frequenz der Netzspannung von 50 Hz und den höheren Harmonischen bis zur 10ten Ordnung. In der Differenz (rechts-oben als Einschub dargestellt) der beiden Signale fällt auf, daß die Versorgungsspannung im Mittel (gestrichelte Linie) nur wenig geglättet wurde (0,7 dB ist in der gleichen Größenordnung, wie die Meßgenauigkeit), jedoch der Beitrag des 50 Hz-Brummens und der Harmonischen um über 65 dB reduziert wurde. Eine Veränderung um 5 dB bedeutet eine Veränderung der Spannung um den Faktor zwei, das 50 Hz-Brummen wird durch den Elektrolytkondensator auf 1/8200stel reduziert. Der am linken Bildrand erkennbare Anstieg ist im wesentlichen das 1/f-Rauschen, welches statistisch bedingt ist und sich durch elektrische Bauelemente nicht weiter reduzieren läßt.

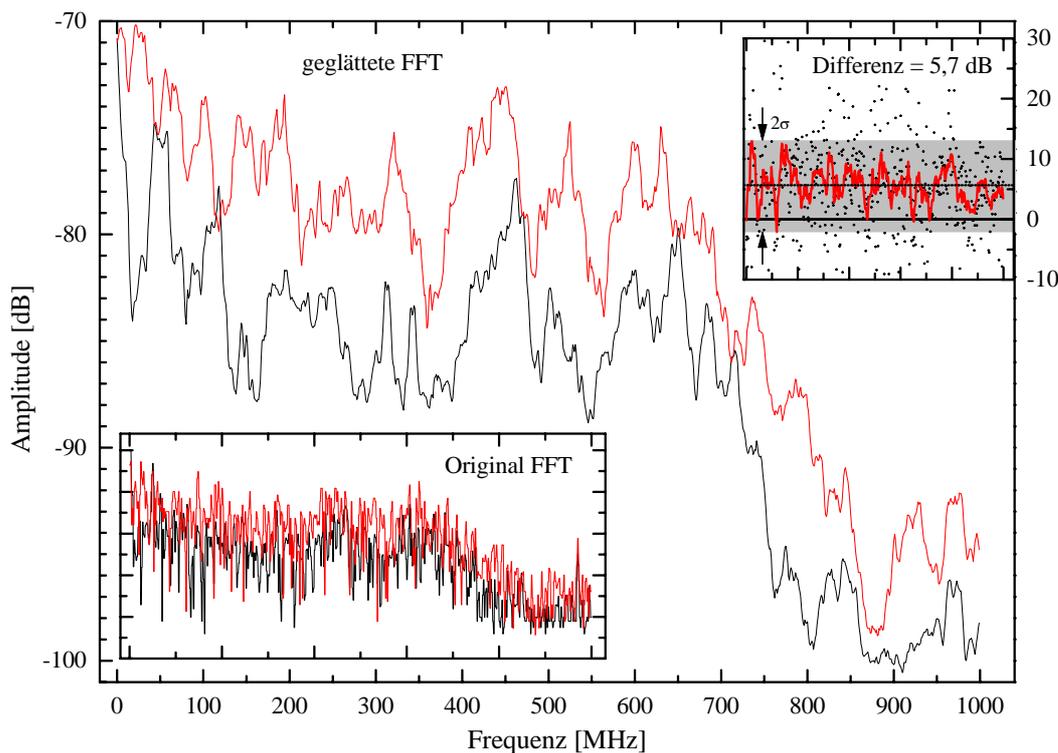


Abbildung 5.9: In der Graphik ist die Fourier-Analyse der Versorgungsspannung der mit Dämpfungskondensator gegenüber gestellt. Die originalen FFT-Kurven sind im Einschub unten-links dargestellt. Im Hauptbild wurden beide Kurven stark geglättet geplottet. Die obere Kurve zeigt die Frequenzanteile der Spannung ohne, die untere den Verlauf mit Kondensator. Die Differenz aus beiden ungeglätteten Kurven zeigt der Einschub oben-rechts als Punktwolke, nach starkem Glätten ergibt sich der gestrichelte Verlauf. Die waagerechte Linie markiert den Mittelwert der Differenzpunkte. Er beträgt 5,7 dB, d.h. das Rauschen auf der Spannungsversorgung wird im Mittel um den Faktor zwei reduziert, grau unterlegt ist die 1σ -Umgebung dieser Auswertung.

In der Abbildung 5.9 ist die Rauschreduktion im hochfrequenten Bereich durch den Keramik-Kondensator dargestellt. Der Bildeinschub unten-links zeigt die originalen FFT-Daten aus der Messung mit und ohne Dämpfungskondensator. Für eine bessere Darstellung wurden die stark verrauschten Frequenzgänge im großen Bild geglättet dargestellt. Deutlich sieht man die Reduktion aller Frequenzanteile durch den Kondensator (untere Kurve). Im Einschub oben-rechts ist die ungeglättete Differenz zwischen der Versorgungsspannung mit und ohne Kondensator dargestellt (Punktwolke). Auch hier ist zur Verdeutlichung eine geglättete Kurve dargestellt. Die waagerechte Linie stellt einen Mittelwert der Frequenzunterdrückung

über den ganzen Bereich dar. Das Rauschen wird durch den Kondensator um 5,7 dB (entsprechend einem Faktor zwei) reduziert. Der grau unterlegte Bereich stellt die 1σ -Umgebung der Mittelung dar.

Die elektrische Entkopplung des Nutzsignals von Störpulsen auf den Zuleitungen zwischen der Schaltung und der Empfängerlichtschiene findet durch die in die Verstärkung integrierten Frequenzfilter effektiv statt. Die Frequenzbreite der Filter beträgt circa 210 Hz, die Abbildung 5.10 zeigt die Frequenzkurve eines Eingangsfilters mit der Resonanzfrequenz von 9030 Hz. Deutlich ist der Anstieg zu tiefen Frequenzen nach einem $1/f$ -Verlauf zu erkennen, gestrichelt ist zur Verdeutlichung die Funktion $y \sim 1/f$ dargestellt. Die zuvor besprochenen Aspekte

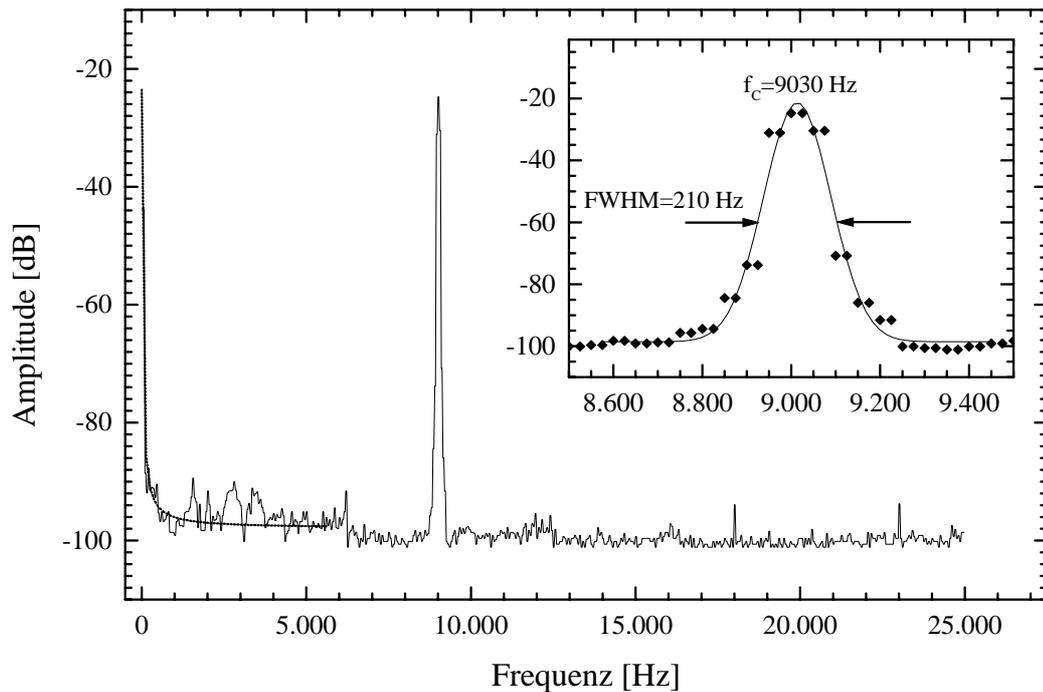


Abbildung 5.10: Dargestellt ist die Frequenzkennlinie des Eingangsfilters für das Referenzsignal. Im Einschub ist der Frequenzbereich um die Resonanz ($f_0 \approx 9030$ Hz) stark gedehnt dargestellt und die Halbwertsbreite ($\Delta f \approx 210$ Hz) angetragen. Durch die geringe Halbwertsbreite ($\Delta f/f \approx 0,02$) des Filters werden sowohl niedrig-, als auch hochfrequente Störsignale effektiv unterdrückt.

bedingen eine möglichst kurze Distanz zwischen den ICs und den Keramik-Kondensatoren für das Blocken der hochfrequenten Störungen. Durch die geringen Nutzströme, die in den Eingangsstufen verstärkt werden, müssen die Signalwege ebenfalls sehr kurz sein. Daneben muß die Schaltung schmal und lang angeordnet sein, damit bei der perspektivischen Miniaturisierung mit SMD-Technik und Bauelementen kleinster Bauformen* die Schaltung komplett mit in ein Lichtschienenprofil paßt. So wäre ein sehr gefälliges Gesamterscheinungsbild möglich. Im Anhang B.1 ist der reale Aufbau der Platine dargestellt. Die Schaltung und die Anordnung der Bauelemente, ebenso wie das Layout der Leiterbahnen wurde mit EAGLETM entworfen und optimiert.

*Einige SMD-Bauformen in Originalgröße:

- Aktive Bauelemente: μ Sim: ■ SC70-5: ■ SOT23:  TSSOP: 
- Passive Bauelemente: 1206: ■ 0805: ■ 0603: ■ 0402: ■ 0201: .

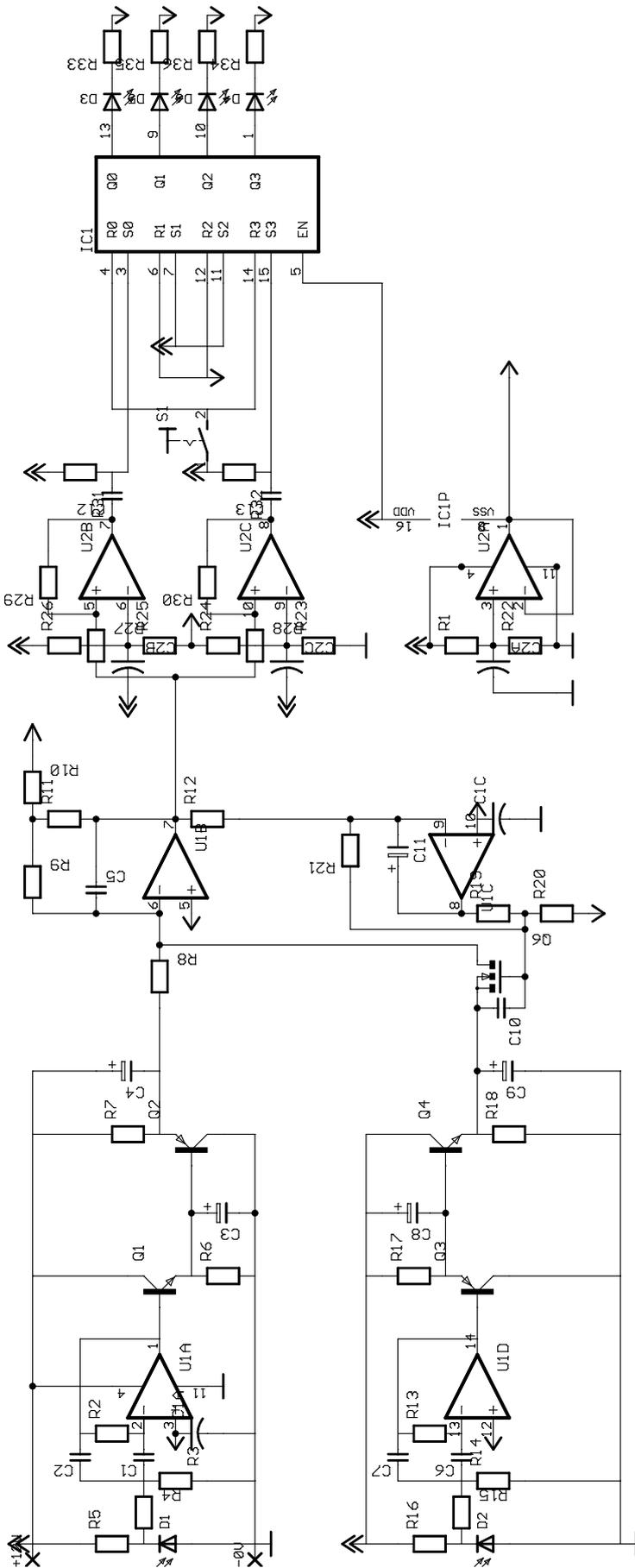


Abbildung 5.11: Detaildarstellung der Empfängerschaltung. Die Bauteilbezeichnungen sind mit den zuvor benutzten identisch.

5.6 Frequenzgenerator

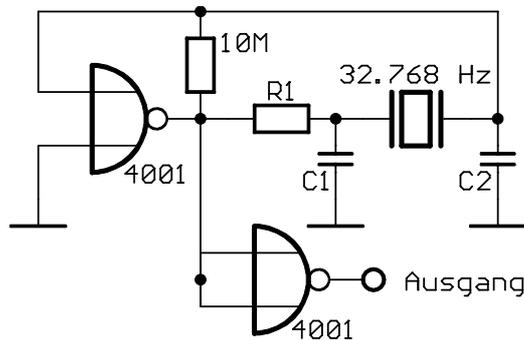


Abbildung 5.12: Elektrischer Aufbau der Schwingerschaltung für die Sendeschienen mit einem Schwingquarzes.

Die Sendeschiene setzt sich aus drei funktionellen Gruppe zusammen. (siehe Abb. 5.1 auf Seite 51). Nebenstehend ist der elektrische Aufbau des Frequenzgenerators der Sendeschiene dargestellt. Durch die Verwendung eines Schwingquarzes ist eine hohe Frequenzstabilität und Reproduzierbarkeit in der Frequenz gewährleistet. Bei Messungen mit dem Zähler des Frequenzgenerators (beschrieben in Kapitel 3.5 auf Seite 28) konnten unter Normalbedingungen (Raumtemperatur) keine Schwankung in der Frequenz festgestellt werden, d.h. sie waren kleiner als der relative Instrumentenfehler von $\Delta f/f = 6 \cdot 10^{-6} = 6 \text{ ppm}$, bei Betrieb über meh-

re Tage und Meßzyklen. Alternativ wurden die Frequenzpulse über die Meßkarte des PCs gezählt und die Zeit elektronisch gestoppt. Diese Messung hatte den gleichen Fehler, wie der Frequenzgenerator und bestätigte dessen Messergebnisse.

Für eine saubere Schwingung der Schaltung muß das RC-Glied bestehend aus R_1 und C_1 der Grundfrequenz, für die der Quarzkristall geschnitten wurde, angepaßt werden. Es gilt unter anderem:

$$2\pi f_0 = \frac{1}{R_1 C_1} \quad \text{mit} \quad f_0 = 32\,768 \text{ Hz} = 2^{15} \text{ Hz} \quad (5.11)$$

Mit dem Kondensator C_2 bilden C_1 und der Schwingquarz ein sogenanntes Π -Netzwerk. Hierüber finden sich viele grundsätzliche Arbeiten in der Literatur^[49], nach der die Werte genau berechnet werden können. Danach wurden folgende Werte für die Kondensatoren und den Widerstand gewählt:

$$R_1 = 100 \text{ k}\Omega \quad C_1 = 470 \text{ pF} \quad C_2 = 1 \text{ nF} \quad (5.12)$$

Das Gesamtsystem soll unter normalen Umweltbedingungen funktionieren. Daher ist es wichtig zu testen, ob diese Stabilität der Frequenz auch bei Temperaturänderung erhalten bzw. im tolerierbaren Bereich bleibt. Was tolerierbar ist, ergibt sich aus der Empfindlichkeit des Eingangsbandpaßfilter mit einer Halbwertsbreite von 210 Hz. Die Untersuchungen von Seite 56 geben eine Alarmschwelle von 0,3 % vor. Damit Schwankungen der Sendefrequenz keinen Alarm suggerieren, müssen sie kleiner als 1 Hz sein. Die Abbildung 5.13 erklärt dieses Intervall: Dargestellt ist die Kurve des Bandpaßfilters. Im rechten Einsatz ist die Spitze vergrößert dargestellt. Zusätzlich zeigen die waagerechten Linien das Maximum und eine Abweichung von 0,3 % an. Dieses Amplitudenintervall ist 12 Hz breit. Sitzt das Filtermaximum nicht genau über der Sendefrequenz, so fällt die Kurve steiler ab, das Toleranzintervall wird kleiner. Im linken Einsatz ist das Extrem dargestellt (10 % Abweichung), es ergibt sich ein Intervall von 1 Hz. Die Schaltung wurde im in Kapitel 4.6 beschriebenen Ofen verschiedenen Temperaturen zwischen -40°C und $+90^\circ\text{C}$ ausgesetzt und die Ausgangsfrequenz gemessen. Die Auflösung des Meßgerätes betrug etwas unter 100 mHz, die Temperatur wurde mit einem Fehler von etwa $\Delta T \approx 0,5^\circ\text{C}$ gemessen. Über den gesamten Temperaturbereich änderte sich die Frequenz um etwa 1 Hz, dieser Wert entspricht dem Toleranzintervall für den extremsten

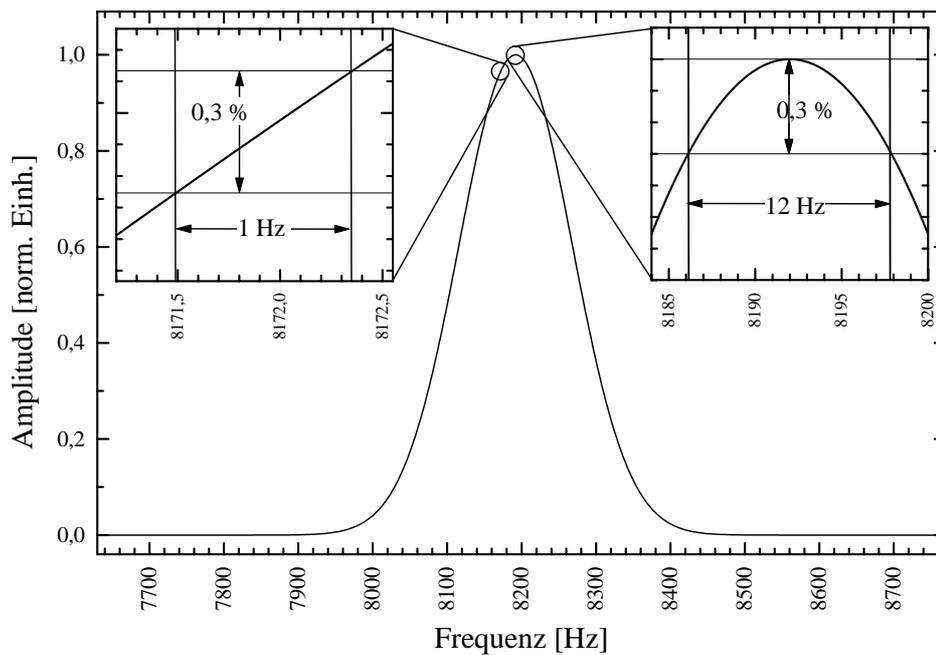


Abbildung 5.13: Die Abbildung erklärt die Größe des Toleranzintervalls für den Frequenzgenerator. Rechts ist als waagerechte Linie die Marke 0,3 % unterhalb des Maximums angedeutet und das sich daraus ergebende Intervall von 12 Hz. Links ist die Situation bei maximal möglicher Abweichung zwischen Sendefrequenz und Bandpaßfilter (aufgrund von Bauteiltoleranzen) dargestellt. Daraus ergibt sich ein Intervall von etwa 1 Hz.

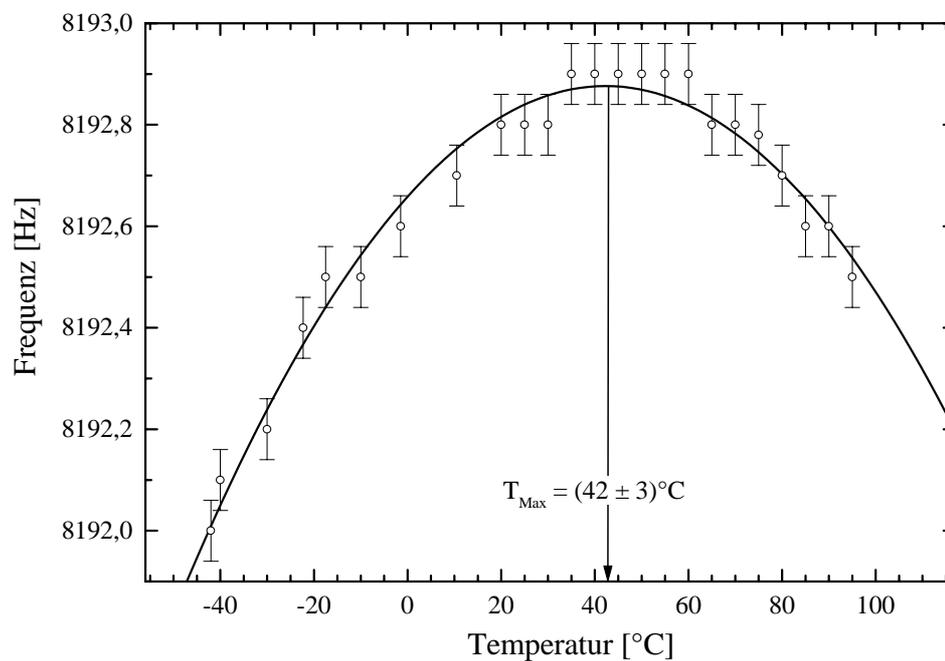


Abbildung 5.14: Im Temperaturintervall -40°C und $+90^\circ\text{C}$ wurde die Ausgangsfrequenz der Schwingungsschaltung gemessen. Die Auflösung des Messgerätes ist als Fehlerbalken an die Meßwerte angetragen. Bei einer Temperatur von $T_{\text{max}} \approx 40^\circ\text{C}$ zeigt sich eine maximale Ausgangsfrequenz, über den Meßbereich ändert sich die Frequenz um weniger als 1 Hz, ein absolut akzeptabler Wert für den realen Einsatz.

Fall der Abweichung von Sendefrequenz und Bandpaßfiltermaximum. Die Abbildung 5.14 zeigt das Ergebnis der thermischen Untersuchungen. Neben der Stabilität ist das sichere Anschwingen des Frequenzgenerators wichtig. Schaltet man die Schaltung ein, so wird aus dem Rauschen eine Frequenz verstärkt, es muß sichergestellt sein, daß immer die Grundfrequenz und nicht etwa eine der höheren oder niederen Harmonischen anschwingt. Zu diesem Zweck wurde mit einer rechnergesteuerten Spannungsversorgung die Schaltung wiederholt an- und ausgeschaltet und die angeschwungene Frequenz gemessen. Die Schaltung wurde einen Tag lang (21,5 Stunden) mit $f=(402,9 \pm 1,2)$ mHz angeschaltet (ca. alle zwei Sekunden). Es ergaben sich 31310 ± 90 Anschaltzyklen und es schwang immer, d. h. ohne eine Ausnahme die gewünschte Frequenz innerhalb von weniger als 10 ms an. Dies bedeutet, daß sich nach weniger als einhundert Schwingungen die Schaltung stabilisiert hat. Nach den Richtlinien des VdS[†] für Sicherheitssysteme^[88] muß das Gesamtsystem nach 10 Sekunden nach Anlegen der Spannungsversorgung betriebsbereit sein und überwachen. Vor diesem Hintergrund sind solche Einschwingzeiten absolut akzeptabel.

5.7 Pulsformer

Der Frequenzgenerator aus Kapitel 5.6 erzeugt Pulse mit einer Frequenz von 32768 Hz. Diese Grundfrequenz wird mit einigen CMOS-Bausteinen in ihrer Frequenz und dem Tastverhältnis verändert. Das nebenstehende Schaltungsbild zeigt den elektrischen Aufbau, bestehend aus einigen wenigen Logikbausteinen der CMOS-Serie 40xx^[18]. Die Schaltzustände werden mit verschiedenen Begriffen bezeichnet. Gleiche Bedeutung haben: *an* = *high* = 1 = *eins* und *aus* = *low* = 0 = *Null*. Ein Flip-Flop (4013, IC2A und B in Abbildung 5.15) ist ein Logikbaustein, der bei jeder Schaltflanke von *an* nach *aus* den Ausgangswert umschaltet. Damit läßt sich die Eingangspulsfrequenz halbieren^[53]. Der Logikbaustein *NAND* (IC1C und IC1D) ist ein *AND* (logisch *und*) und eine anschließende Negierung des Signals (aus *an* wird *aus* und umgekehrt). Diese Standard-Bausteine sind gut und vor allem in sehr kleinen Gehäusen beschaffbar und preiswert. Sie verbrauchen relativ wenig Leistung und arbeiten mit sauber definierten Pegeln für *an* und *aus*, es gilt jede Spannung unter 1,3 V als *aus* und jede über 2,9 V als *an*. Die nebenstehende Schaltung verwendet als Pegel 5 V, damit läßt sich auch ein nachgeschalteter Transistor sehr gut durchschalten. Die Großbuchstaben in der Schaltung bezeichnen verschiedene Punkte, an denen die verschiedenen Signale nach den einzelnen Komponenten und das Ausgangssignal anliegen. In der folgenden Abbildung 5.16 sind die zeitlichen Verläufe der Spannungen dargestellt. So läßt sich am besten das Zustandekommen

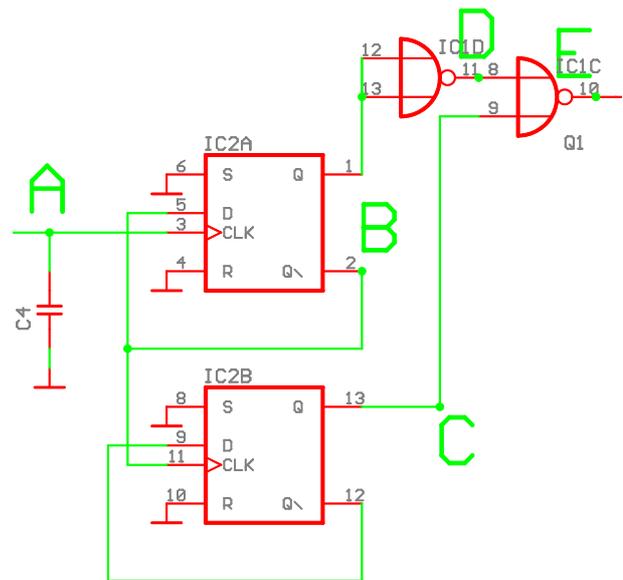


Abbildung 5.15: Elektrischer Aufbau des Pulsformers für die Ansteuerung der Sendelichtschiene.

[†]VdS = Verein der Sachversicherer

des Ausgangssignales bei „E“ verstehen. Hier wird die Spannung nur *high*, wenn das Signal an „C“ und „D“ *low* ist. Damit ändert sich das Tastverhältnis von 1:1 auf 1:3 und damit geht eine Reduzierung des Leistungsverbrauches um die Hälfte einher.

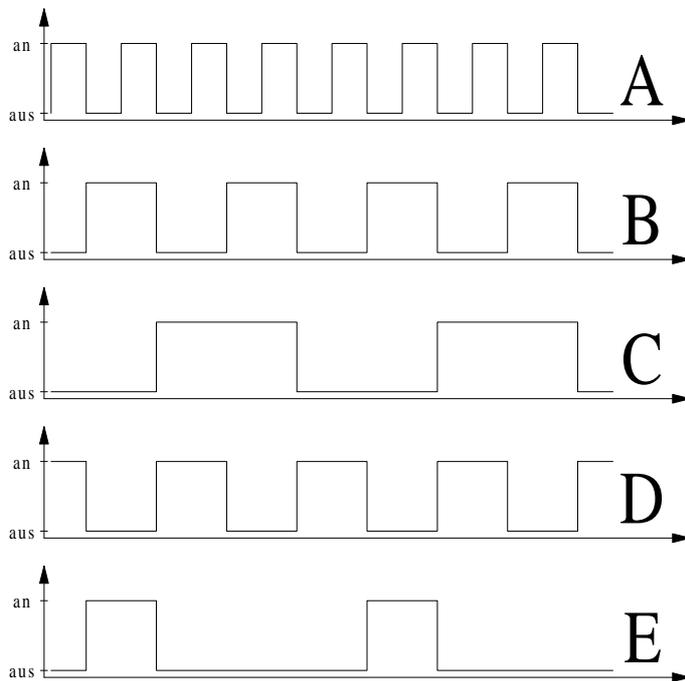


Abbildung 5.16: Die Abbildung zeigt die verschiedenen logischen Signale an den in der Abbildung 5.15 bezeichneten Punkten. Im vertikalen Vergleich kann man sich die Entstehung des Ausgangssignales klarmachen. Immer wenn bei **A** eine fallende Flanke ist, wird im Flip-Flop IC2A der aktuelle Wert umgeschaltet. Das NAND-Gatter IC1C wird nur *low*, wenn an beiden Eingängen ein *high* anliegt. Ein Flip-Flop benötigt einige dutzend Nanosekunden um umzuschalten^[63], es entstehen hinter dem IC2D Nadelimpulse mit dieser Dauer. Daher wird die Negierung mit dem Gatter IC1D, die logisch nicht notwendig ist, als Verzögerung mit der gleichen Zeit eingeführt.

5.8 Gesamtsenderschaltung

Nachdem die Pulse mit der richtigen Frequenz generiert und geformt sind, müssen sie zur Ansteuerung einer kompletten Lichtschiene verstärkt werden. Es stehen digitale Signale mit einer Amplitude von 5 V (TTL-Pegel) zur Verfügung. Damit kann ein leistungskräftiger Feldeffekt-Transistor (FET) angesteuert werden. Der Innenwiderstand im durchgeschalteten Zustand ist sehr viel geringer als bei einem normalen Transistor und daher erwärmt sich dieses Bauelement weniger. Es gilt für die Verlustleistung:

$$P_{Verlust} = U \cdot I_0 = R_{transistor} \cdot I_0^2 \quad \text{mit z.B.} \quad \begin{array}{l} R_{DSon} \approx 0,005 \Omega^{[63]} \\ I_0 \approx 0,8 \text{ A} \end{array} \quad \text{ergibt sich:}$$

$$P_{Verlust} = 5 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot (2 \text{ A})^2 = 3,2 \text{ mW} \quad \text{bei ein Schaltleistung von:} \quad (5.13)$$

$$P_{Schalt} = U_0 \cdot I_0 = 12 \text{ V} \cdot 0,8 \text{ A} = 9,6 \text{ W} \quad \left(\frac{P_{Schalt}}{P_{Verlust}} = 3000 \right)$$

Die Abbildung 5.17 zeigt die gesamte Schaltung der Sendeeinheit für die Lichtschiene. Die Realisierung als Platine mit bedrahteten Bauelementen zeigt die Abbildung B.2 im Anhang B.1, um einen Eindruck von der Größe der Schaltung zu bekommen. Für den Bau des fertigen Produktes muß diese Schaltung in ein Lichtschienen-Profil mit den Außenabmessungen

8 × 8 mm passen. Hier muß auf die kleinsten zur Zeit verfügbaren Bauelemente zurückgegriffen werden. Das kleine Rechteck in der Abbildung deutet die für die gesamte Schaltung im fertigen Produkt zur Verfügung stehende Fläche von 6 × 30 mm im Vergleich zum bedrahteten Aufbau für das Labormuster an. Dies ist mit derzeit am Markt verfügbaren Bauelementen in SMD-Bauweise zu realisieren.

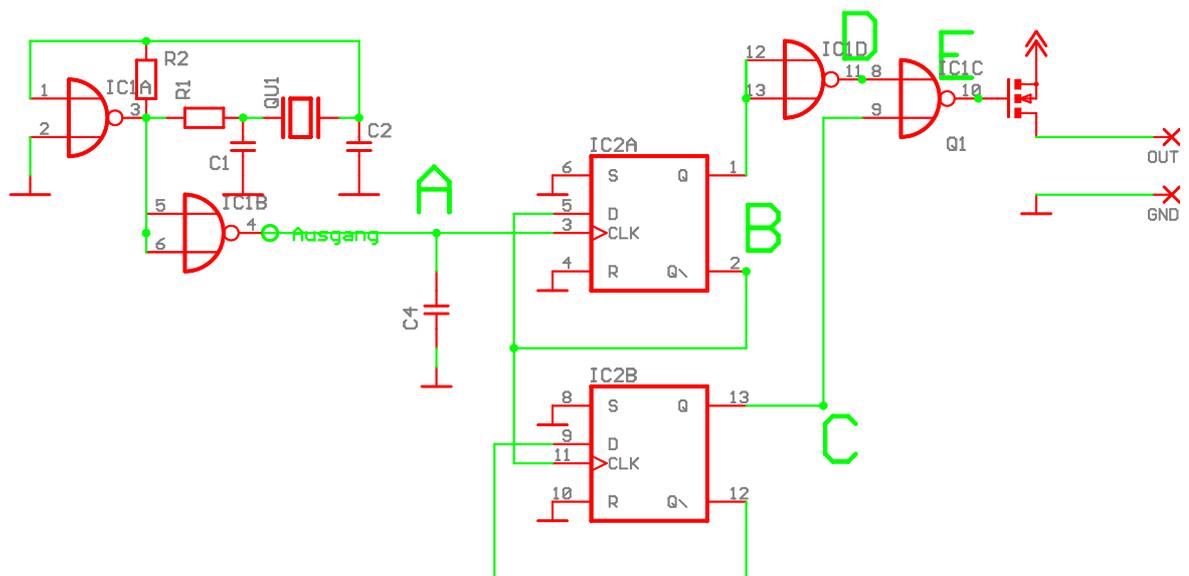


Abbildung 5.17: Es ist der elektrische Aufbau der Senderschaltung von der Frequenzgeneration und Pulsformung bis hin zur Ansteuerung der Lichtschiene durch den MOSFET Q1 dargestellt. Die einzelnen Komponenten werden in den Abbildungen 5.6 und 5.15 vergrößert dargestellt und eingehend erklärt.

Kapitel 6

Zusammenfassung

6.1 Zielsetzung des Projektes

Als Ergebnis der Arbeit liegt der Prototyp einer innovativen Glasscheibensicherung vor, die sich durch verbesserte Eigenschaften der technischen Daten und der Servicefreundlichkeit sowie der Einsatzmöglichkeiten gegenüber allen z.Z. am Markt angebotenen Sicherungseinrichtungen auszeichnet; darüber hinaus kann sie als sensible Haveriewarkeinrichtung für glasgekapselte Räume, in denen z.B. Gefahrenstoffe gelagert werden, eingesetzt werden. Hier kann an die kontinuierliche Überwachung von Laborscheiben, Säuretanks oder Transportglasbehältern, wie etwa eingelaster Sondermüll gedacht werden. Bei diesen Anwendungen ist die generelle Zuverlässigkeit weitaus wichtiger als wirtschaftliche Überlegungen. Das neue Wirkprinzip der Glasscheibensicherung gewährleistet lange Lebensdauer an verschiedenen, transparenten Medien. Das Produkt soll sich durch eine umweltfreundliche und einfache Produktion von Teilmodulen auszeichnen, die vor Ort vom ausgebildeten Monteur zum Endprodukt mit hoher Zuverlässigkeit installiert und an die örtlichen Gegebenheiten anpassen läßt.

6.2 Wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse für die Industrie

Recherchen bei Unternehmen aus der Alarmtechnikbranche haben einen großen Bedarf für eine solche Durchtrittsmeldung ergeben. Eine Reihe von Firmen haben bestätigt, daß ein solches Produkt eine Meldung der höchsten Sicherheitsklasse zur Verfügung stellt, die sonst nur durch weitaus kostspieligere Anlagen erreicht wird; zudem haben diese nicht den Vorteil der Nachrüstbarkeit. Zwei Firmen, die über ein umfangreiches F&E-Potential verfügen (Jahresumsatz: ca. 1,5 Mrd. DM), haben bereits abschätzen können, daß sie sich bei dem konzipierten Produkt Absatzmengen in sechsstelligen Stückzahlen pro Jahr vorstellen können. Der Stückpreis eines solchen Systems kann sich nach den vorhandenen Preisen richten. Marktübliche Systeme dieser Sicherheitsklasse werden für ca. 2000,- DM angeboten. Um allerdings hohe Absatzzahlen zu erreichen, muß das neue Produkt im Preis deutlich niedriger liegen. Nach Abschätzung aller Kosten könnte ein Produkt zu einem Verkaufspreis zwischen 300,- DM und 400,- DM realisiert werden, und es wäre damit ungleich preiswerter als alle Konkurrenzprodukte in dieser Sicherheitsklasse auf dem Markt. Für die dieses Sicherheitssystem produzierende Firma bedeuten diese Preisvorgaben einen acht- bis neunstelligen (!) Jahresumsatz, wenn das Produkt entsprechend den oben genannten Absatzmöglichkeiten verkauft werden kann. Die beiden europäischen Marktführer vertreiben ihre Produkte weltweit

auf dem Gebiet der Alarmtechnik, so daß von einer realistischen Einschätzung der Marktlage ausgegangen werden kann. Es gibt in Europa noch drei weitere Firmen mit zusammen einem vergleichbaren Absatzvolumen. Bei dementsprechender Nachfrage kann mit einem neunstelligen Jahresumsatz gerechnet werden. Desweiteren verzeichnet auch das Marktsegment der Glasbruchmelder dem Gesamt-Sicherheitsmarkt vergleichbare Wachstumsraten von 4-5 % pro Jahr. In der Abbildung 6.1 sind die Wirtschaftsdaten- und Prognosen für den Zeitraum von 1988 bis 2002, aufgestellt von zwei verschiedenen Wirtschaftsorganisationen. Zum einen sind die Daten als Markterhebung vom unabhängigen Institut für Wirtschaft (IfW), zum anderen vom „Bundesverband der Hersteller von Elektronik“ in einer Befragung ihrer Mitglieder erhoben worden. Der Erhebung des IfW sind auch die Zahlen für die Entwicklung des Teilmarktes für Glasbruchmelder entnommen.

6.3 Wissenschaftliche Ergebnisse

In den vorangehenden Kapiteln wurden für das „Optoelektronische Sicherheitssystem“ für alle Komponenten die erfolgreiche Konstruktion vorgestellt. Es hat sich gezeigt, daß ein solches System funktioniert und aufgebaut werden kann. Die geplante Empfindlichkeit und damit Sensibilität hat das System erreicht und kann damit sowohl als Alarmanlagenkomponente als auch als Havarieschutzeinrichtung Verwendung finden. Weiterführende Arbeiten haben gezeigt, daß eine großtechnische Realisierung zur Herstellung des Produktes mit geringen Stückkosten und hoher Zuverlässigkeit möglich sein ist. In dieser Richtung, vor allem der konkrete Entwurf von Fertigungsmaschinen und das Aufstellen eines kompletten Qualitätssicherungs-Managements, müssen noch einige Arbeiten vollendet werden. Erst in einer relativ weit gediehenen Phase der Produktionsumsetzung, d. h. wenn erste Kleinserien gefertigt werden können, muß das Produkt sich der Zertifizierung durch den Verein der Sachversicherer (VdS) stellen. Diese umfassende und harte Prüfung kann das Sicherheitssystem bestehen, es ist seit der ersten

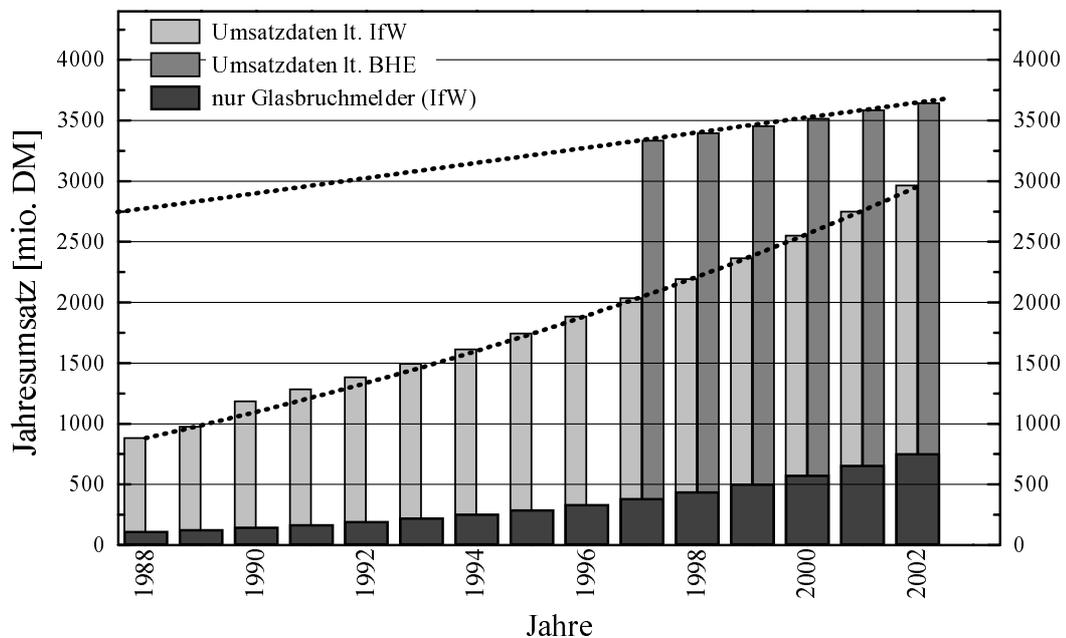


Abbildung 6.1: Dargestellt sind Weltmarktdaten und -prognosen für den Zeitraum 1988 bis 2002 für Sicherheitssysteme. Die Daten sind zum einen vom „Institut für Wirtschaft“ zum anderen vom „Bundesverband der Hersteller von Elektronik“ erhoben worden. Explizit dargestellt ist die Marktentwicklung nur für Glasbruchmelder als eine Teilkomponente eines Sicherheits-Gesamtsystems.

Idee an die Einhaltung und Erfüllung der VdS-Richtlinien gedacht worden, so daß hier nur die Probleme der produktionstechnischen Kontinuität in der Qualität und damit der Güte des Produktes gelöst werden müssen. Im Rahmen dieser Arbeit ist der Prototyp so entwickelt worden, daß ausschließlich einfache Produktionsschritte, die sowohl von Hand als auch mit maschineller Unterstützung oder vollautomatisch realisiert werden können, vorkommen. Für die Verklebung von Werkstücken existieren schon sehr viele auch großtechnische Umsetzungen, so daß hier die wenigsten Probleme auftreten werden. Die Bestückung funktioniert schon im normalen Produktionsalltag mit Dioden des sichtbaren Spektralbereichs für einige Millionen LEDs pro Jahr.

Das „Optoelektronische Sicherheitssystem“ wurde im Rahmen dieser Arbeit zum Patent angemeldet und unter der Nummer DE 196 54 850 offengelegt. Die Prüfung des Patentbesitzes zur endgültigen Erteilung wird zur Zeit durchgeführt.

6.4 Wirtschaftliche Bedeutung der Forschungsergebnisse für die OPTO-System GmbH

6.4.1 Schilderung der aktuellen Marktlage

Auf dem nationalen und internationalen Markt gibt es eine Vielzahl von Herstellern von Glasbruchmeldern. Die wichtigsten Anbieter in Deutschland sind die Aritech GmbH in Hilden, die Firma IGS in Hagen und die Albstädter effeff Fritz Fuss GmbH & Co KG. Alle drei Firmen haben sich mit ihren Glasbruchmeldern auf dem deutschen Markt fest etabliert. Neben diesen Großanbietern gibt es noch eine Reihe von kleineren Wettbewerbern.

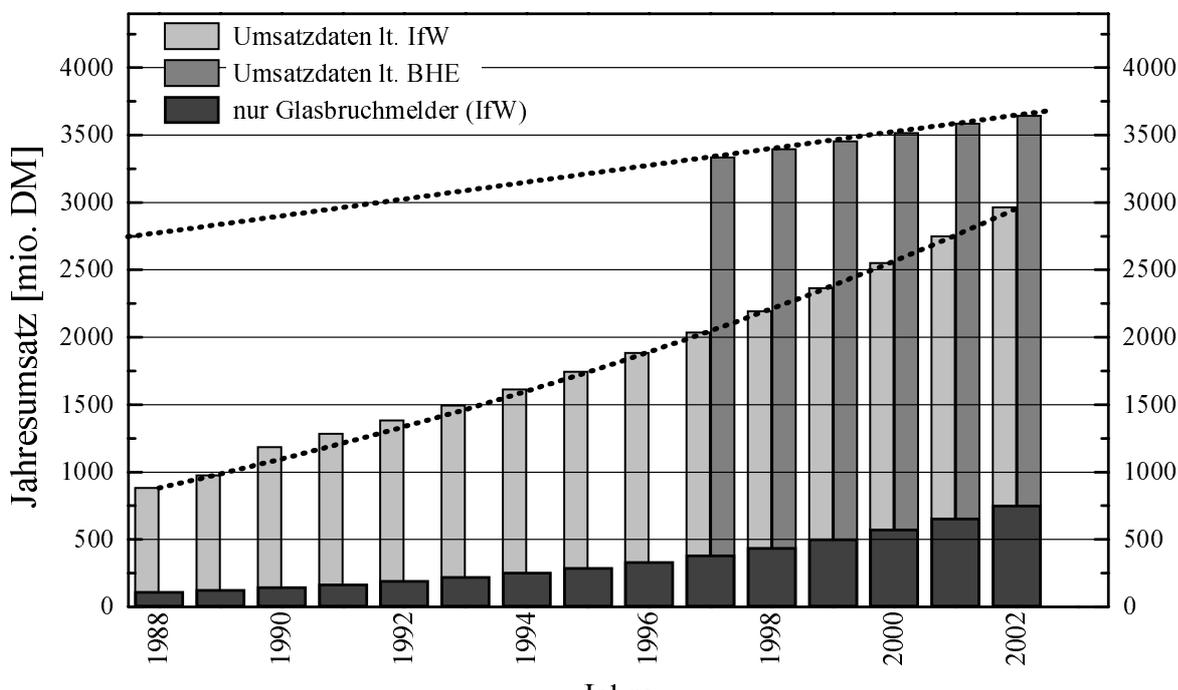


Abbildung 6.2: Umsatzzahlen des Sicherheitstechnikmarkts und die zukünftige Entwicklung nach Einschätzung zum einen des Wirtschaftsforschungsinstituts IfW und zum anderen nach der Mitgliederbefragung durch den Dachverband der Hersteller relevanter Komponenten (BHE).

40 % der Bevölkerung haben Angst vor ungebetenen Gästen^[85]. Neben einer guten mechanischen Sicherung sind es vor allem Alarmanlagen, von denen Einbrecher sich abschrecken las-

sen. Dieser Markt verzeichnet deshalb Jahr für Jahr kräftige Zuwächse. Der Umsatz bei sicherheitstechnischen Anlagen stieg bei einem durchschnittlichen, jährlichen Wachstum von über 10 % von 1988 bis 1994 von 887 Mio. auf 1,63 Mrd. DM. Seit 1994 zeigt der Markt eine relativ konstante Wachstumsrate von 9 %. 10-15 % dieses Umsatzes entfallen auf Glasbruchmeldeanlagen. Das entspricht 1998 einem Umsatz von ca. 350 bis 450 Mio. DM (je nach Datenerhebung). Die Abbildung 6.4.1 zeigt die Entwicklung der Umsatzzahlen im „Sicherheitstechnik“-Markt der vergangenen fünfzehn Jahre. Die Marktdynamik und das Wachstum des Alarmanlagenmarktes im Allgemeinen und mit ihm das des Glasbruchmeldermarktes im Besonderen bieten dem Unternehmen die Chance, dieses speziell entwickeltes Produkt auf dem Markt mit Erfolg einzuführen. Vorteilhaft ist hierbei, daß der Zielmarkt nicht erst zu kreieren ist, mit dem Produkt kann das Unternehmen mit einem innovativen Produkt in einen gut bekannten Markt vorstoßen. Der Erfolg der von Lichtvorhänge der Firma Telenot GmbH, der ein ähnliches Wirkprinzip aufweist, zeigt, daß Lichtvorhänge generell eine Innovation darstellen, die dem konventionellen Glasbruchmelder in vieler Hinsicht überlegen ist. Die auf dem Markt befindlichen Lichtvorhänge können zwar als etwas überteuert und vor allem im in Puncto EMV (Handybeständigkeit) als verbesserungswürdig eingestuft werden, aber die Markteinführung ist bisher sehr vielversprechend verlaufen. Diese Entwicklung kann die OPTO-System GmbH mit dem Optoelektronischen Sicherheitssystem nutzen, da es alle zur Zeit auf dem Markt befindlichen Produkte um eine Sicherheitsklasse übertreffen wird, das heißt insbesondere, daß es störunanfällig ist und zudem preiswerter eingeführt werden kann.

6.4.2 Produktkalkulation

Die auf dem Markt befindlichen Lichtvorhänge sichern bei einem Kaufpreis von zur Zeit etwa 2000 DM (bzw. 1000 €) eine Fläche von $2 \times 2 \text{ m}^2$ Glas. Sie kosten also 1000 DM (500 €) pro Meter Fensterbreite. Das durch die OPTO-System GmbH produzierte „Optoelektronische Sicherheitssystem“ wird nach aktuellen Kalkulationen pro Meter Breite nur 400 DM (200 €) kosten wird. Damit wäre dieses Sicherheitssystem um den Faktor 2,5 preiswerter als technisch und sicherheitstechnisch vergleichbare Produkte. Die nachfolgende Kalkulation auf Seite 72 (Tabelle 6.2) bezieht sich auf einen Meter System, das sich je aus einem Meter Sendeschiene, Referenzstrecke und Empfangsschiene zusammensetzt und zeigt auf der Grundlage gültiger Angebote und aktueller Geschäftszahlen der OPTO-System die Zusammensetzung der angesetzten Kosten.

6.4.3 Umsatzkalkulation

Jahr	2001	2002	2003
Umsatz [Meter]	1000	10.500	20.000
€ / Meter	250	200	120
Umsatz [€]	> 250.000	2.100.000	2.400.000

Tabelle 6.1: Die Tabelle zeigt eine Umsatzkalkulation für das OPTOELEKTRONISCHE SICHERHEITSSYSTEM für die Jahre 2001 bis 2003. Es ist angenommen, das der Preis aufgrund von erhöhter Nachfrage und möglicher Konkurrenz im Jahr 2003 merklich reduziert werden muß. Zu diesem Zeitpunkt hätte sich die Forschung für das Sicherheitssystem bereits amortisiert.

Es wird geschätzt, daß OPTO-System im Jahr 2001 die ersten Infrarotlicht-Durchtrittssicherungssysteme verkaufen wird. Das System von OPTO-System wird als Kom-

ponente verkauft und von den Sicherheitsausrüstern zu Komplettsystemen zusammengestellt an Installateure weitergegeben. Hauptkunden von OPTO-System sollen demzufolge Grundig Security und andere Anbieter dieser komplexen Sicherheitssysteme werden. Endkunden, wie Geschäfte, beziehen ihre Sicherheitssysteme von diesen Sicherheitstechnikanbietern. Mit der Entwicklungsabteilung von Grundig Security wurden bereits Gespräche über die Einbindung in deren Sicherheitssysteme geführt. Grundig zeigt sich sehr interessiert an einer schnellen Belieferung mit Komponenten der OPTO-System GmbH. Erste Bedarfsforschungen von Grundig haben einen monatlichen Bedarf von 10.000 Meter System ergeben^[50]. Damit wäre ein breiter Markt erschließbar. Eine Umsatzkalkulation mit vorsichtigeren Vorgaben zeigt die Aufstellung in der Tabelle 6.1. Aufgrund des konservativen Bewertungsansatzes wird unterstellt, daß in den Jahren 2002 und 2003 wegen der wachsenden Abnahmeerwartungen durch die Industrie und der möglichen Einführung von anderen Wettbewerbsprodukten die Verkaufspreise gesenkt werden müssen.

Lieferant	Bezeichnung	€/Einh.	Zahl	∑ [€]
Materialkosten				
altron	SMD-Widerstände, Toleranz 1 %	0,0024	30	0,07
pk Compon.	SMD-Kondensatoren, 1 nF, Tol. 2 %	0,0291	4	0,12
A+B Electronic	SMD-Opamps,4er, TL 084 CD	0,3988	2	0,80
A+B Electronic	SMD 4er RS-Latch CMOS 4043	0,3426	1	0,34
A+B Electronic	SMD-Transistor, BC 846 A	0,0506	4	0,20
A+B Electronic	SMD-Kondensatoren, 100 pF	0,0102	12	0,12
Jauch	SMD-Quarz, $f_0=32.768$ Hz	0,4857	1	0,49
Caramant*	Glasprofilstange, 1 Meter	6,3911	2	12,78
Gemmel*	Metallprofil, Alu, 1 Meter	0,6136	2	1,23
SLI GmbH	SMD-Photodioden	0,0706	20	1,41
SLI GmbH	SMD-IREDS	0,0409	20	0,82
Loctite	Kleber Glas-Epoxydharz	0,0051	1	0,01
Loctite*	Kleber Glas-Metall	0,1023	1	0,10
TKT	Hülse für Referenzkabel	0,4231	1	0,42
Optronik*	Lichtleitkabel, 2 Meter	1,1964	1	1,20
Fertigungskosten				
Beier GmbH	Profil bearbeiten, pro Meter	0,6136	2	1,23
Naumann GmbH	Bestücken der Leiterstreifen	0,0061	50	0,31
Naumann GmbH	Schaltungsbestücken pro Bauelement	0,0061	45	0,27
OPTO-System	Zusammenkleben der Komponenten	10,2258	2	20,45
OPTO-System	Prüfen, Dauertest, etc.	3,5000	2	7,00
Vertriebskosten				
OPTO-System	Vertrieb und Verpackung	13,8000	1	13,80
Gemeinkosten				
OPTO-System	Verwaltungskosten	8,0000	1	8,00
OPTO-System	Materialgemeinkosten	4,0000	1	4,00
OPTO-System	Fertigungsgemeinkosten	6,0000	1	6,00
	Summe			81,17
	Gewinn			118,83
	Nettoverkaufspreis in €			200,00

Tabelle 6.2: Produktkalkulation für das Optoelektronische Sicherheitssystem auf der Basis der Preise vom September 1999. Bei den mit einem Stern markierten Lieferanten sind erst vorläufige Angebote eingegangen und auch der Lieferant selbst steht noch nicht eindeutig fest.

Danksagung

Diese Arbeit wurden durch das BMBF im Rahmen des Förderprogrammes *Forschungsoperation* Programmteil FuE-Gemeinschaftsvorhaben-Ost (FUEGO) gefördert. Im Rahmen dieser Kooperation zwischen den Partner OSA-Elektronik GmbH (und im weiteren Verlauf der ausgegründeten OPTOSystem GmbH) und der GFaI e.V. konnte ich als Projektleiter auf uneingeschränkte Unterstützung und Hilfe aller Beteiligten bauen. Besonders möchte ich das persönliche Engagement der Geschäftsführer Dr. Albrecht (OPTOSystem GmbH) und Dr. Tiedke (GFaI e.V.) erwähnen. Allen Mitarbeitern dieser Unternehmen bin ich zu Dank verpflichtet.

Vielen Dank an die tatkräftige Unterstützung beim Schreiben der Anträge, die zu dieser Förderung geführt haben möchte ich den Mitarbeitern des OUT e.V. (Optotransmitter-Umweltschutz-Technologie e.V.) besonders dem Geschäftsführer und meinem jetzigen Chef Dr. Dittmann aussprechen. Vielen Dank an Herrn Eibner, seineszeichens Vorsitzender des OUT e.V. und Geschäftsführer der OSA-Elektronik (jetzt OSA Optolight) GmbH für die fruchtbaren und sehr angenehmen Freiräume, um phantasievoll und gerne arbeiten zu können.

Besondere Dankbarkeit möchte ich der wohl wichtigsten Stiftung meiner Ausbildung aussprechen, die es erst ermöglicht hat, ein umfangreiches und auf Inhalte konzentriertes Studium zu absolvieren: Die PAPA-Stiftung. Herzlichen Dank an meine Eltern, die mir die Wurzeln geschaffen haben, um auf dem Boden zu bleiben und kräftige Schwingen ermöglichen, um mich auch zu großen Projekten und Ideen aufzuschwingen (frei nach Goethe).

Nicht in Worte ist die Dankbarkeit meiner Frau Sammia gegenüber zu fassen. Trotzdem ein Versuch: Ich danke ihr für das Verständnis zu vielen schlaflosen Nächten meinerseits, für die wiederholten Erziehungsurlaube an Wochenenden, um das Kapitel *kurz* zuende zu schreiben, für ihre Engelsgeduld und die vielen Liter Tee, die mich vier Uhr nachts vor so manchem harten Aufprall auf die Tastatur gerettet haben.

Ich danke meinen Kindern, dass sie in den meisten Nächten, in den ich geschrieben habe, durchgeschlafen, den Rechner nie während der Arbeit haben abstürzen lassen und sogar Verständnis für das Paar Ringe unter den Augen hatten, meistens.

Ich danke den freiwilligen und unfreiwilligen Helfern, die mit feinem Rotstift über die Manuskripte gehuscht sind, danke Gerd, danke Stefan.

Meinem Betreuer, Gutachter und wissenschaftlichem Mentor Prof. Eichler möchte ich meinen herzlichen Dank aussprechen und freue mich sehr auf zukünftige Zusammenarbeiten bei wissenschaftlichen Arbeiten oder Kooperationsprojekten.

Prof. Ding möchte ich für die wertvollen Hinweise und die Begutachtung der vorliegenden Arbeit danken, die aus dem Manuskript eine wissenschaftliche Arbeit haben werden lassen.

Literaturverzeichnis

- [1] SCHOLZ: *Verfahren zur Alterung von lichtemittierenden Dioden*, Siemens AG, München, Patentschrift DE 195 09 864 A1 (1995)
- [2] *Testlopedia - A Plastics Testing Encyclopedia*, Plastics Technology Laboratories, Inc., Pittsfield, USA (Okt. 2001) (<http://www.ptli.com/list.html>)
- [3] *Brockhaus*, F. A. Brockhaus, Mannheim, Band 21, S. 331, (1999)
- [4] C. R. BAMFORD, E. J. HUDSON: *A Spectrophotometric Method for the Determination of the Ferrous / Ferric Ratio of Iron in Soda-Lime-Silica Glass*, Gordon & Breach, New York, VII Int. Congress Glass (1965)
- [5] L. BERGMANN, C. SCHAEFER: *Lehrbuch der Experimentalphysik*, de Gruyter-Verlag, Berlin, New York, Band III: OPTIK, (1987)
- [6] DONALD R. GRIFFIN: *Wie Tiere denken*, Deutscher Taschenbuch Verlag, München, S. 221, (1990)
- [7] KONRAD VON FRISCH: *The dance language and orientation of bees*, Harvard University Press (1965)
- [8] ANDREAS HURNI: *Grundbegriffe rund ums Blitzgerät*, (2002). (<http://home.tiscalinet.ch/fotografie/blitz>)
- [9] C. DIENDORFER, M. MAIR, W. SCHULZ, W. HADRIAN: *Lighting current measurements in Austria - experimental setup and first results*, Veröffentlichung vorgestellt auf der 25sten Internationalen Konferenz für Blitz-Schutz (ICLP), Rhodos, (Sept. 2000)
- [10] W. BLUDAN: *Halbleiter Optoelektronik*, Hanser-Verlag, München, Wien (1995)
- [11] *Lexikon der Physik*, Spektrum-Verlag, Heidelberg, Berlin, Band I, S. 362, (1999)
- [12] I. N. BRONSTEIN, K. A. SEMENDJAJEW: *Taschenbuch der Mathematik*, Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt a. Main (1985)
- [13] WOLFGANG H. MÜLLER: *Bruchmechanik I, Grundlagen der linear-elastischen Bruchmechanik*, Vorlesungsskript nach einem Manuskript von J. OLSCHESKI und W. BROCKS, TU Berlin, S. 5 ff. (WS2001/02)
- [14] C. H. SCHOLZ: *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, Cambridge University Press, Cambridge (1990)
- [15] WOLFGANG H. MÜLLER: *Bruchmechanik I, Grundlagen der linear-elastischen Bruchmechanik*, Vorlesungsskript nach einem Manuskript von J. OLSCHESKI und W. BROCKS, TU Berlin, S. 12 oben (WS2001/02)
- [16] A. A. GRIFFITH: *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*, Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A 221, 163-198 (1920)

- [17] H. COLE: *Magnetic susceptibility and constitution of coloured glasses*, Journal of the Society of Glass Technology (England), Vol. 35, S. 5–40 (1951)
- [18] DON LANCASTER: *Das CMOS-Kochbuch*, IWT-Verlag, Vaterstetten (1992)
- [19] DAVID R. LIDE(Herausgeber): *Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, Boston, 72. Auflage, S. 4-163 (1992)
- [20] C. R. BAMFORD: *Colour Generation and Control in Glass*, Glass Science and Technology, Elsevier, New York, S. 35–38 (1977)
- [21] *Max Delbrück - Biography*, Nobel Foundation (2001). (<http://www.nobel.se/medicine/laureates/1969/delbruck-bio.html>)
- [22] H. LEHMANN: *Technisches Datenblatt Dynamic Flex 22*, Roda Chemie, Berlin (1998)
- [23] DR. PAUL BEYERSDORFER: *Glashüttenkunde*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 2. Auflage, S. 149 (1964)
- [24] *B1 - esp@cenet - ... Ihr Weg zu Patenten*, Europe's Network (März 2001). (<http://de.espacenet.com/>)
- [25] *Novasil S50, Technisches Datenblatt*, Otto Chemie GmbH, Berlin (1999)
- [26] W. I. SMIRNOW: *Lehrgang der Höheren Mathematik*, VEB Deutscher Verlag für Wissenschaften, Berlin, Band II, Kapitel VII.180, S. 554–559, (1988)
- [27] *Safety Tips*, Watchlight Corporation, Kalifornien, USA (1999). (<http://www.watchlight.com/safety.html>)
- [28] W. H. W. TUTTLEBEE: *Cordless Communication in Europe*, Springer Verlag, London (1990)
- [29] K. STEINBUCH, W. RUPPRECHT: *Nachrichtentechnik*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg (1967)
- [30] H.-P. KETTERLING: *Wege zum Betriebsfunk*, expert-Verlag, Renningen-Malmsheim (1998)
- [31] *Signalübertragung auf elektrischen Niederspannungsnetzen*, DIN-EN 50065-1 A3 (1996)
- [32] H. VAN STRAELEN: *Frequenzen für den Verkehr mit SeeFuSt und KüFuSt*, TRANS OCEAN e.V., Cuxhaven (2001)
- [33] STEVE DASHEW: *Amateurfunk- Netze*, TRANS OCEAN e.V., Cuxhaven (2001). (<http://www.bluewater.de/ham-nets.htm>)
- [34] THOMAS SCHAEERER: *Glasbruchmelder*, E-Online (November 2001). (<http://www.e-online.de/sites/sic/0303251.htm>)
- [35] *Datenblatt: Piezo Glasbruchmelder PGM 1*, Security Systems International (2001). (<http://www.ssam.com/qwertasdf/alarm/docs/pd1595803314.htm>)
- [36] P. STATT: *Chip-Technologie zum Aufbau einer Präzisions-LED*, G.E.R.U.S. GmbH Berlin (1999)
- [37] HANS-DIETER MÜLLER: *Glas und seine Herstellung*, Glaserei Döll GmbH (2001). (<http://www.glaserei-doell.de/herstellung.htm>)
- [38] REINHARD SCHUBERTH: *Technologie Werkstoffe*, Handwerk und Technik GmbH, Hamburg (1985)

- [39] *FusedSilica 7980, Synthetisches Quarzglas für die Optik*, Präzisions Glas & Optik GmbH (2001). (<http://www.pgo-online.com/de/katalog/7980.html>)
- [40] *Definition für Glas*, American Society for Testing and Materials (ASTM), West Conshohocken, PA. USA (2001)
- [41] DR. PAUL BEYERSDORFER: *Glashüttenkunde*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 2. Auflage, S. 23 (1964)
- [42] R. MATTHEWS, D.R. WEAVER AND S. CROFT: *The Surface Degradation of Glass Within RPL Dosemeters*, Radiat. Prot. Dosim. **65(1-4)**, S. 301-304 (1996)
- [43] KOMMISSION FÜR TERMINOLOGIE: *Definition des Glaszustandes*, Akademie der Wissenschaften der UdSSR (1982)
- [44] *GlassTech DG1896-AM*, Visonic Sicherheitstechnik GmbH, Datenblatt (Mai 1999)
- [45] *Lexikon der Physik*, Spektrum-Verlag, Heidelberg, Berlin, Band V, S. 81, (1999)
- [46] *Hochohm-Widerstände Typ GST 2512*, SRT Resistor Technology GmbH, Cadolzburg (2000). (www.srt-restech.de)
- [47] *Lexikon der Physik*, Spektrum-Verlag, Heidelberg, Berlin, Band III, S. 87, (1999)
- [48] *Lineare-ICs*, iwt-Verlag, Bonn (1996)
- [49] *Richtlinien für den Aufbau elektronischer Schaltungen*, Institute of Electronic and Electrical Engineers (IEEE), ICAN 6539, (1982)
- [50] *OSA-Lichtschiene – Marktanalyse*, Innovationswerkstatt der TU-Berlin, Lehrstuhl für Marketing (März 1996)
- [51] E.F. WASSERMANN, P. ENTEL UND M. ACET: *100 Jahre Grundlagenforschung an Eisenlegierungen*, Physikalische Blätter **56** (5), S. 27–33 (Mai 2000)
- [52] H. WALTHER: *Quantenphänomene eines einzelnen Atoms*, Physikalische Blätter **54** (7/8), S. 625–631 (Juli 1998)
- [53] *100 typische Schaltungen mit Halbleiterbauelementen*, Intermetall GmbH, Freiburg im Breisgau (1967)
- [54] W. I. SMIRNOW: *Lehrgang der Höheren Mathematik*, VEB Deutscher Verlag für Wissenschaften, Berlin, Band I, Kapitel II.79, S. 176–177 (1990)
- [55] W. I. SMIRNOW: *Lehrgang der Höheren Mathematik*, VEB Deutscher Verlag für Wissenschaften, Berlin, Band I, Kapitel III.103, S. 232–238 (1990)
- [56] *Lichtgitter AREAL*, Leuze lumiflex GmbH, Fürstfeldbrück (März 2001). (http://www.leuze.de/deutsch/produkte/arbeits/si_prod/areal/areal.htm)
- [57] W. HABACK: *OSALITE Lichtschiene*, OSAL Lichttechnik GmbH & Co KG, Berlin (2001). (<http://www.osal.de>)
- [58] PATRÍCIA REIS, SILVA GRUNDMÜLLER: *LOCTITE - worldwide design handbook*, Henkel KGaA, Düsseldorf, 2. Ausgabe (1998)
- [59] WILHELM GÖHLER: *Höhere Mathematik*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig (1989)
- [60] ULRICH KILIAN: *Lexikon der Physik*, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin, Band IV, S. 2 (2000)

- [61] H. MOORE, S. N. PRASAD: *A spectrophotometric study of the colours given by iron in alkali-lime-silica and alkali-lime-borosilicate glasses*, Journal of the Society of Glass Technology (England), Vol. 33, S. 336–370 (1949) & Vol. 34, S. 173–219 (1950)
- [62] *Multi-LAB/2 Handbuch*, SORCUS Computer GmbH, Heidelberg (März 1996)
- [63] *National Operational Amplifier Databook*, National Semiconductor, Santa Clara, Kalifornien, USA (1998)
- [64] JAN FRIEDRICH: *Neutrino-Lepton-Streuung*, TU München (2000). (http://www.e18.physik.tu-muenchen.de/~skript/Neutrino_Lepton_Streuung.html)
- [65] *Lexikon der Optik*, Spektrum-Verlag, Heidelberg, Berlin (1999)
- [66] REINHARD KASSNER: *Hochbrechendes phototropes Glas*, Patent DE 44 08 190 C1, Deutsche Spezialglas AG, Grünenplan, 6 S. (3.8.1995)
- [67] *Lexikon der Physik*, Spektrum-Verlag, Heidelberg, Berlin (1999)
- [68] A. KAMIŃSKA, H. KACZMAREK, M. ŚWIĄTEK: *Photoinitiated Degradation of PMMA . . .*, Polish Journal of Chemistry, **71**, S. 1479-1486 (1997).
- [69] *Elementar-Temperatursensoren*, Heraeus Sensor-Nite, Kleinstheim (Juni 2001). (<http://www.heraeus-sensornite.de/d/Produkte/fContentProdukteElementartemperatursensoren.html>)
- [70] WOLFGANG NEUBIG, BERND BRIESE: *Das große Quarzkochbuch*, Franzis-Verlag, Feldkirchen, Kapitel 2.12.11 (1997)
- [71] *Lexikon der Physik*, Spektrum-Verlag, Heidelberg, Berlin, Band 5, S. 444–445 (1999)
- [72] JAN FRIEDRICH: *Wirkungsquerschnitt*, TU München (2000). (<http://www.e18.physik.tu-muenchen.de/~skript/Wirkungsquerschnitt.html>)
- [73] *Ramanspektroskopie*, Apotheker-Verband (2001). (<http://www.apothekealland.at/ArbeitstechnikeninderBioanalytik/C1Electroopticalpropertiesofmolecules/IRandRaman-spectroscopy/Ramanspectroscopy2.htm>)
- [74] DIETER MENDE, GÜNTER SIMON: *PHYSIK, Gleichungen und Tabellen*, VEB Fachbuchverlag, Leipzig (1988)
- [75] U. TIETZE, C. SCHENK: *Halbleiter-Schaltungstechnik*, Springer-Verlag, Berlin (1974)
- [76] *Appliances & Equipment*, Sika Industry, Bad Urach (2000). (<http://www.sika-industry.com/marine/products/index.htm>)
- [77] *Testing Of Silicone Rubber*, General Electric Bayer Silicone Inc., Niederlande (2001)
- [78] *Acceptance criteria for type I structural silicone glazing sealants (Adhesive)*, International Conference of Building Officials, ICBO Evaluation Service Inc., Whittier, California, USA (April 1991)
- [79] O'CONNOR, ROBERTSON: *Willebrord van Roijen Snell* (1996). (<http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/history/Mathematicians/Snell.html>)
- [80] *Lexikon der Physik*, Spektrum-Verlag, Heidelberg, Berlin, Band V, S. 80, (1999)
- [81] E. HOEFER, H. NIELINGER: *Spice*, Springer-Verlag, Berlin (1985)
- [82] K.-H. MÜLLER: *A Spice Cookbook*, intusoft (1991)
- [83] J. M. STEVELS: *Proceedings of the International Commission on Glass*, Butterworths Scientific Publications, London, S. 68–76 (1954)

- [84] S. M. SZE: *Semiconductor Devices – Physics and Technology*, John Wiley & Sons, New York, Singapur (1985)
- [85] ANDREAS LOHSE: *Wenn das Brecheisen regiert*, Tagesspiegel, Berlin (16.11.1996)
- [86] *Programmer Manual TDS 380 für HP 350 SX*, Tektronix GmbH, Unterföhring, Version 1.05, (1997)
- [87] V. V. VARGUINE, T. I. WEINBERG: *Absorption spectra of iron (II) in silicate and phosphate glasses*, Russian Journal of Physical Chemistry (Russia), Vol. 36, S. 174–176 (1962)
- [88] *Anforderungen an Glasbruchmelder*, VdS Schadenverhütung (Dezember 1995)
- [89] DR. PAUL BEYERSDORFER: *Glashüttenkunde*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig, 2. Auflage, S. 35 (1964)
- [90] J. GRABNER, J. ROSCHITZ: *Glas und Rahmen*, Sonderausgabe zur Glastec, TU-Graz/Institut für Hochbau für Architekten (1996/1998).
- [91] *Herstellung von Verbundglas*, Handbuch TROSIFOL (Troisdorf b. Köln) (10/2001). (<http://www.trosifol.com/ger/handbuch/verarbeitung/endverbund.html>)
- [92] *Richtlinie zur Beurteilung der visuellen Qualität von Isolierglas*, Institut des Glaserhandwerks für Verglasungstechnik und Fensterbau (Hadamar) und Bundesverband Flachglas Großhandel, Isolierglasherstellung, Veredlung e.V. (Troisdorf), (Oktober 1996)
- [93] W. A. WEYL: *Coloured Glasses*, The Society of Glass Technology, Sheffield, S. 89–113 (1951)
- [94] DR. CHR. MERRET: *Glasmacherkunst*, Herausgeber JOH. KUNCKELS, Nürnberg, III. Auflage, S. 186/187 (1756)

Abbildungsverzeichnis

2.1	Mie-Streuung	9
2.2	Skizze der Brechung	11
2.3	Prinzip der Totalreflexion	12
2.4	Kurven der Totalreflexion	12
2.5	Innerer Aufbau von Glas	15
2.6	Transmissionskurven verschiedener Glassorten	16
2.7	Absorption von Eisen in Glas	17
2.8	Absorptionskurve von PMMA	18
2.9	Glas-Bruchkante	19
2.10	Bruchbild	20
2.11	Winkelverteilung	21
2.12	Winkelverteilung im Glaskörper	21
3.1	Digitalausgang	24
3.2	Schnittstellenanschlussbox	24
3.3	Spannungsstabilität über 24h	25
3.4	Messstromkreis	26
3.5	Strombelastung 500 mA	26
3.6	Strombelastung 1000 mA	27
3.7	Pulsform der Multi-LAB-Karte	28
3.8	Übersicht aller Pulsformen des Frequenzgenerators	29
3.9	Frequenzdrift des Frequenzgenerators	30
3.10	Fouriertransformierte des Störrauschens	32
4.1	Lichtschienenaufbau	33
4.2	SMD-Dioden-Design 1206	34
4.6	Optische Ausgangsleistung	35
4.3	Strom-Spannungskennlinie einer IRED	35

4.4	Spektrale Empfindlichkeit der Photodiode PD-50-6	36
4.5	Elektrische Kenndaten PD-50-6	36
4.7	Abstrahlcharakteristik einer IRED I	36
4.8	Abstrahlcharakteristik einer IRED II	37
4.9	Räumliche Abstrahlcharakteristik IRED	37
4.10	Ausgangsleistung einer IRED	38
4.11	SMD-Layout 1206	39
4.12	Empfangscharakteristik einer Photodiode I	39
4.13	Empfangscharakteristik einer Photodiode II	40
4.14	Prinzipskizze des inneren Aufbaus der Kunststofflichtschiene	40
4.15	Optoelektronisches Sicherheitssystem	42
4.16	Aushärtengeschwindigkeitdes	43
4.17	UV-Kleber	44
4.18	Umwelttest für Klebstoff	45
4.19	Prinzip der thermischen Ausdehnungsmessung	47
4.20	Thermische Ausdehnung von Leiterplattenmaterialien	48
4.21	Thermische Ausdehnung von Acryl-Stabmaterial	48
4.22	Thermische Ausdehnung verschiedener Materialien im Vergleich	48
5.1	Blockschaltbild der Elektronik des Sicherheitssystems	51
5.2	Zeitkurve des Nullabgleichs	53
5.3	Bandpaßfilter	53
5.4	Response-Funktion des Eingangsfilterverstärkers	55
5.5	Aufbau der Komparatorschaltung	56
5.6	Signal pro Kratzerstrecke	57
5.7	Schwellwertsignalgeber	57
5.8	Dämpfung durch Elektrolytkondensator	58
5.9	Dämpfung durch Keramik-Kondensator	59
5.10	Frequenzkennlinie	60
5.11	Gesamtschaltung	61
5.12	Frequenzgenerator	62
5.13	Toleranzintervall	63
5.14	Thermisches Verhalten der Schwingschaltung	63
5.15	Pulsformer	64
5.16	Logiksignale	65

5.17 Senderschaltung	66
6.1 Weltmarkt für Sicherheitstechnik	68
6.2 Umsatzzahlen des Sicherheitstechnikmarktes	69
A.1 E-Reihen	88
B.1 Platine	89
B.2 Platine der Senderschaltung	90
B.3 Meßkopf	92
B.4 Meßkopf	92

Tabellenverzeichnis

2.1	Mechanische Parameter von Gläsern	15
2.2	Ionen in Glas	16
3.1	Langzeitdrift der Spannung	26
3.2	Stromstabilität des Netzgerätes	27
4.1	Platinenmaterials FR4	34
4.2	Grenzflächensysteme und verwendete Kleber	43
4.3	Thermische Daten und Ausdehnungen	49
4.4	Längenunterschiede	49
6.1	Umsatzkalkulation	70
6.2	Produktkalkulation für das Optoelektronische Sicherheitssystem auf der Basis der Preise vom September 1999. Bei den mit einem Stern markierten Lieferanten sind erst vorläufige Angebote eingegangen und auch der Lieferant selbst steht noch nicht eindeutig fest.	72
B.1	Spezifikationen DMM-M3850D	91

Anhang A

Tabellen und Listen

A.1 Auflistungen von Klebstoffdaten

	Loctite 322	Loctite 350	Loctite 3106	Dynaflex 22
Chemische Basis	Acrylat	Urethanmethacrylat	Urethanacrylat	Polyurethan
Eigenschaften im flüssigem Zustand				
Erscheinungsform	klar, hellgelb	klar, farblos	klar, hellgelb	dunkelbraun
Spez. Dichte* [g/cm ³]	1,0	1,09	1,08	1,2
Viskosität* [Pa·s]	5,8	4,5	5,0	thixotrop
Flammpunkt [°C]	> 100	>100	78	>60
Eigenschaften im ausgehärteten Zustand				
Ausdehnungskoeff. α [1/K]	80×10^{-6}	100×10^{-6}	k.A.	k.A.
Wärmeleitfähigkeit [W/m·K]	0,1	0,1	k.A.	k.A.
Härte nach Shore D ^[2]	68	60	53	50-70**
Zugfestigkeit [N/mm ²]	9	6-15	19	9-16
Schrumpf [%]	8	k.A.	k.A.	k.A.
Brechungsindex*	k.A.	1,51	1,48	-
Aushärtezeit* [†] [s]	20	30	10	72 Stunden
Elongation [‡] [%]	160	k.A.	250	370

A.2 Elektrische Auflistungen

*Bei Raumtemperatur = 25°C

**Dieser Wert wurde nach Shore A^[2] bestimmt.

[†]Klebspalt = 2 mm, UV-Licht mit $\lambda = 365$ nm und 100 mW/cm² bzw. bei 50% Luftfeuchtigkeit.

[‡]Elongation bis zum Bruch nach ASTM D638^[2].

E 6	E 12	E 24	E 48	E 96	E 6	E 12	E 24	E 48	E 96
100	100	100	100	100				316	316
				102					324
			105	105	330	330	330	332	332
				107					340
		110	110	110				348	348
				113			360		357
			115	115				365	365
				118					374
	120	120	121	121				383	383
				124		390	390		392
			127	127				402	402
				130					412
		130	133	133				422	422
				137			430		432
			140	140				442	442
				143					453
150	150	150	147	147				464	464
				150	470	470	470		475
			154	154				487	487
				158					499
		160	162	162			510	511	511
				165					523
			169	169				536	536
				174					549
	180	180	178	178		560	560	562	562
				182					576
			187	187				590	590
				191					604
			196	196			620	619	619
		200		200					634
			205	205				649	649
				210					665
			215	215	680	680	680	681	681
220	220	220		221					698
			226	226				715	715
				232					732
			237	237			750	750	750
		240		243					768
			249	249				787	787
				255					806
			261	261		820	820	825	825
	270	270		267					845
			274	274				866	866
				280					887
			287	287			910	909	909
				294					931
		300	301	301				953	953
				309					976

Abbildung A.1: Übersicht der Wertabstufungen bei den E-Reihen E 6, E 12, E 24, E 48, E 96. Bei diesem Projekt werden Widerstände der E 96-Reihe und Kondensatoren nach der E 6-Reihe eingesetzt.

Anhang B

Komponenten

B.1 Schaltungsrealisationen

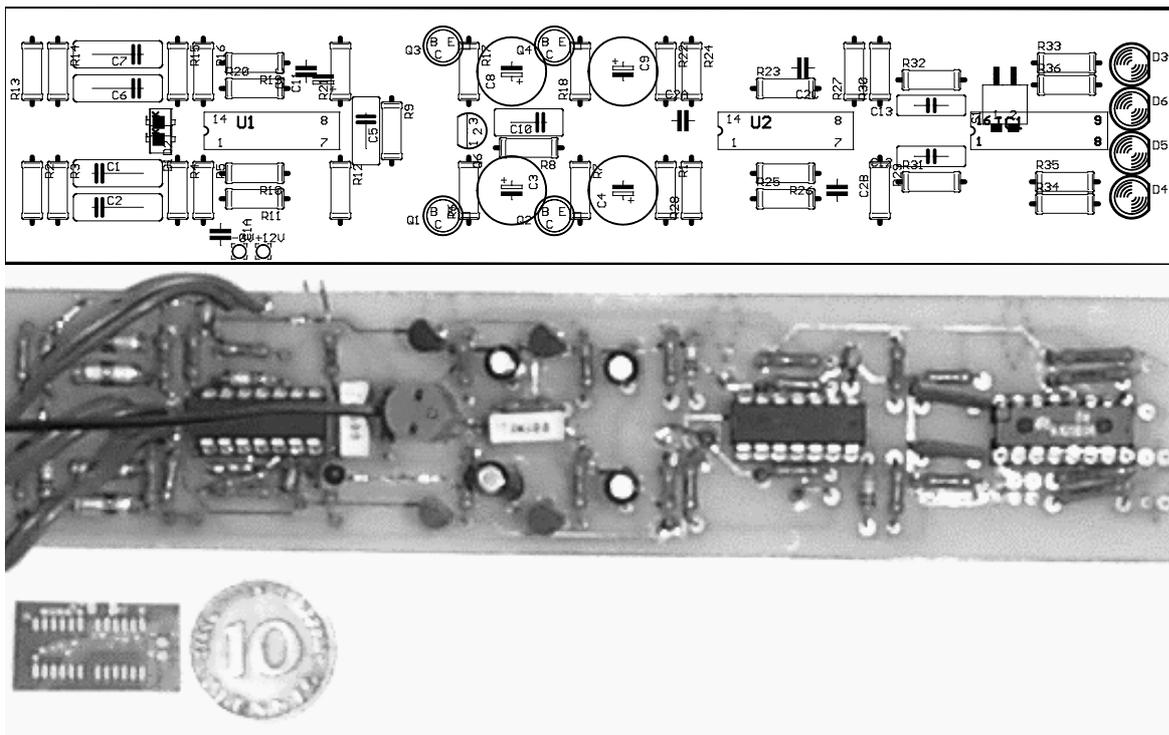


Abbildung B.1: In dieser Abbildung ist oben die räumliche Anordnung der Bauelemente auf der Platine der Empfängerschaltung als Ausgabe einer Software dargestellt. Durch einiges Probieren und Optimieren ist diese sehr dichte Anordnung auf der Platine entstanden, bei der zudem auch die Anordnung in den Schaltblöcken (siehe Abbildung 5.1 auf Seite 51 erhalten geblieben ist. Das Layout wurde mit der Simulations- und Schaltungsentwurfsoftware EAGLETM [81][82] entworfen und optimiert. In der unteren Hälfte ist ein Foto der Realisierung der simulierten Schaltung dargestellt. Man findet fast alle Bauteile an den vorgegebenen Plätzen wieder und auch die elektrischen Eigenschaften entsprachen den Simulationen. Der reale Aufbau zeigt zudem, das auch in der vorliegenden bedrahteten Version der benötigte Platz noch verringert werden könnte. Die kleine Leiterplatte links unten soll die ungefähre Größe der entgeltigen Leiterplatte verdeutlichen, die in die Lichtschiene integriert werden könnte. Um allerdings die Integrationsdichte zu erhöhen, müsste die Leiterplatte mehrlagig ausgeführt werden, d. h. die elektrischen Bahnen in mehreren Ebenen übereinander angeordnet sein.

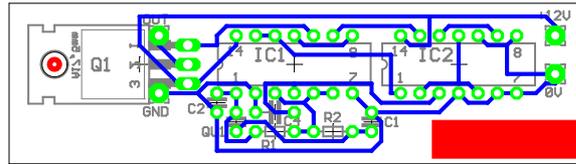


Abbildung B.2: Hier dargestellt ist die Ätzzvorlage für die Sendeplatine des Labormusters. Zusätzlich sind die Bauelemente-Dimensionen und ihre Beschriftung dargestellt. Das Rechteck rechts-unten deutet die maximal zur Verfügung stehende Fläche für die Schaltung im fertigen Produkt an. Hier kann ausschließlich mit SMD-Bauelementen gearbeitet werden.

B.2 Digital-Multimeter

Für die Messungen mit kalibrierter Meßwerterfassung wurde das DMM M3850D mit RS232-Schnittstelle, für kleine Handmessungen das DMM VC820 und VC444 von Conrad eingesetzt. In Tabelle B.1 sind für das kalibrierte Gerät die spezifizierten Meßbereiche, Fehler und Auflösungen aufgelistet.

B.3 Meßkopf

Um die Abstrahlcharakteristik von LEDs im Sichtbaren und Infraroten schnell und möglichst reproduzierbar zu vermessen, wurde der hier vorgestellte Meßkopf entwickelt und aufgebaut. Die Abbildung B.3 zeigt einen Acrylglaskörper, in den Nuten eingefräßt wurden und zwei identische Stücke dann zusammengeklebt wurden. Es entstehen so radial abgehende Kanäle mit hier $1 \times 1 \text{ mm}^2$ Querschnittsfläche. Jeder Kanal ist 70 mm lang und soll das Licht in diese Winkelrichtung kollimieren. Die Kanäle sind jeweils um 10° gegeneinander versetzt, die Kollimierung geschieht auf unter $0,5^\circ$ genau. Am Ende jedes Kollimators sitzt eine Photodiode, wie in Kapitel 4.3 vorgestellt. Der Photostrom einer jeden Photodiode wird gemessen und in eine Spannung zwischen 0 und 2 V verstärkt. Diese können dann vom Meßrechner direkt und parallel gemessen werden und über eine Kalibrierkurve direkt in photometrische Größen umgerechnet werden. Mit einer kleinen Software kann dann die Abstrahlcharakteristik innerhalb von Sekundenbruchteilen fertig dargestellt werden. Die Daten stehen digital zur Verfügung und können exportiert mit anderen Programmen weiter ausgewertet werden.

Für die Messung der Photoströme in der Größenordnung von wenigen pA ist ein empfindlicher Verstärker für jede einzelne Diode notwendig. Sie sollten zudem auch möglichst ähnliche Eigenschaften und wenig Drift aufweisen. Die folgende Abbildung zeigt das Platinenlayout der Verstärkerschaltung. Es kommen sehr rauscharme Operationsverstärker von National Semiconductor [63] und sehr hochohmige Rückkoppelwiderstände mit geringen Toleranzen ($100 \text{ M}\Omega$ mit 0,5 % Toleranz und einem Temperaturkoeffizient kleiner als 100 ppm/K) zum Einsatz. Der sehr symmetrische Aufbau bringt möglichst gleiche Bedingungen für die Einzelverstärker. Zudem wird die Versorgungsspannung an jedem einzelnen IC mit einem Elektrolytkondensator (gegen niederfrequente Störungen) und einem Keramikkondensator (gegen hochfrequente Störungen und Einstrahlungen) abgesichert, damit der Meßkopf nicht nur unter Laborbedingungen eingesetzt werden kann.

Betriebsart	Meßbereich	Genauigkeit	Auflösung
Gleichspannung	400 mV	$\pm 0,8\% + 3$ digit	0,1 mV
	4 V	$\pm 0,8\% + 1$ digit	1 mV
	40 V	$\pm 0,8\% + 1$ digit	10 mV
	400 V	$\pm 0,8\% + 1$ digit	100 mV
	1000 V	$\pm 1,0\% + 3$ digit	1 V
Wechselspannung	4 V	$\pm 1,0\% + 5$ digit	1 mV
	40 V	$\pm 1,0\% + 5$ digit	10 mV
	400 V	$\pm 1,0\% + 5$ digit	100 mV
	750 V	$\pm 1,2\% + 5$ digit	1 V
Frequenz der Wechselspannung 50 bis 400 Hz			
Gleichstrom	400 μ A	$\pm 1,0\% + 2$ digit	100 nA
	4000 μ A	$\pm 1,0\% + 2$ digit	1 μ A
	40 mA	$\pm 1,2\% + 3$ digit	10 μ A
	400 mA	$\pm 1,2\% + 3$ digit	100 μ A
	4 A	$\pm 1,5\% + 5$ digit	1 mA
	20 A	$\pm 1,5\% + 5$ digit	10 mA
Wechselstrom	400 μ A	$\pm 1,5\% + 5$ digit	100 nA
	4000 μ A	$\pm 1,5\% + 5$ digit	1 μ A
	40 mA	$\pm 2,0\% + 5$ digit	10 μ A
	400 mA	$\pm 2,0\% + 5$ digit	100 μ A
	4 A	$\pm 2,5\% + 5$ digit	1 mA
	20 A	$\pm 2,5\% + 5$ digit	10 mA
Frequenz des Wechselstroms 50 bis 400 Hz			
Widerstand	400 Ω	$\pm 1,2\% + 2$ digit	0,1 Ω
	4 k Ω	$\pm 1,0\% + 2$ digit	1 Ω
	40 k Ω	$\pm 1,0\% + 2$ digit	10 Ω
	400 k Ω	$\pm 1,0\% + 2$ digit	100 Ω
	4 M Ω	$\pm 1,2\% + 2$ digit	1 k Ω
	40 M Ω	$\pm 1,5\% + 2$ digit	10 k Ω
Kapazität	40 nF	$\pm 3,0\% + 10$ digit	10 pF
	400 nF	$\pm 3,0\% + 5$ digit	100 pF
	4 μ F	$\pm 3,0\% + 5$ digit	1 nF
	40 μ F	$\pm 3,0\% + 5$ digit	10 nF
	100 μ F	$\pm 4,0\% + 5$ digit	100 nF
Frequenz	5 Hz	$\pm 0,1\% + 3$ digit	0,001 Hz
	50 Hz	$\pm 0,1\% + 3$ digit	0,01 Hz
	500 Hz	$\pm 0,1\% + 3$ digit	0,1 Hz
	5 kHz	$\pm 0,1\% + 3$ digit	1 Hz
	50 kHz	$\pm 0,1\% + 3$ digit	10 Hz
	500 kHz	$\pm 0,1\% + 3$ digit	100 Hz
	5 MHz	$\pm 0,1\% + 3$ digit	1 kHz
	10 MHz	$\pm 0,1\% + 3$ digit	10 kHz

Tabelle B.1: Aufgelistet sind die vom Hersteller mit Kalibrierzertifikat angegebenen Meßbereiche mit ihren Toleranzen, Fehlern und Auflösung

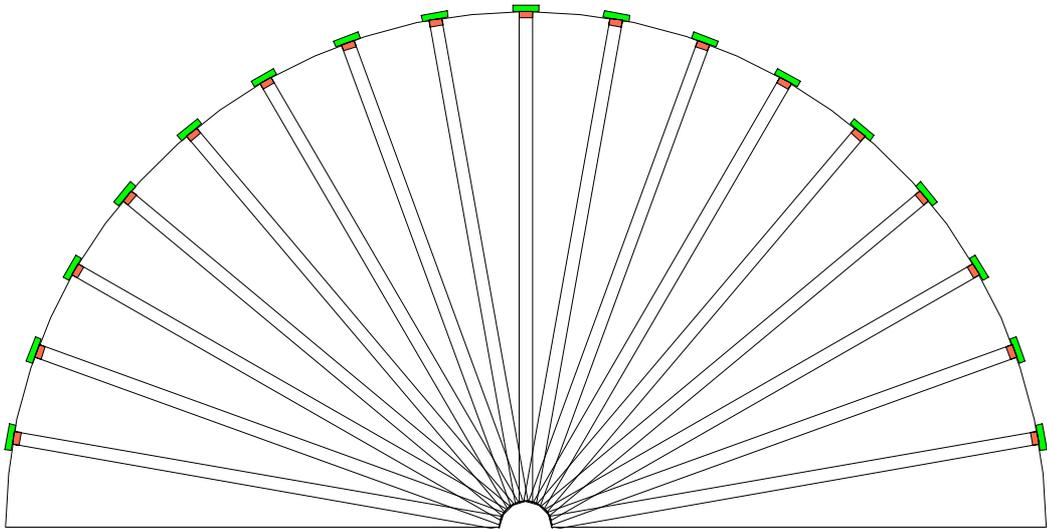


Abbildung B.3: Die Abbildung zeigt den Acrylkörper mit den Meßkanälen an deren Ende je eine Photodiode sitzt. Um optisches Übersprechen zu vermeiden sind die einzelnen Kanäle nach dem zusammenfügen der beiden Teile von innen matt-schwarz lackiert worden. Für eine Messung muß der Meßkopf nur über dem leuchtenen Objekt plziert werden, die Messung und Auswertung geschieht automatisch.

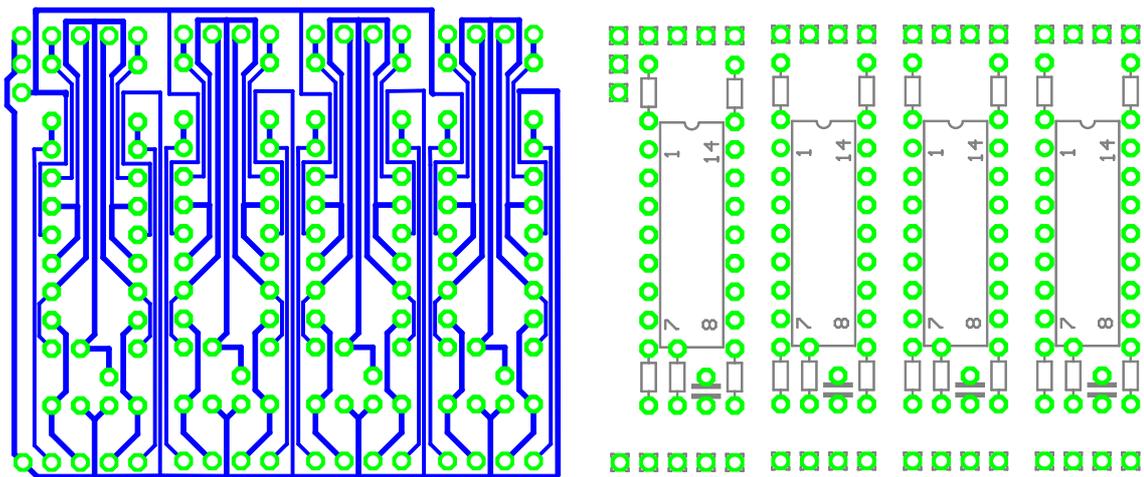


Abbildung B.4: Die Abbildung zeigt links die Kupferkaschierung der Verstärkerschaltung und rechts die Anordnung der Bauelemente auf der Oberfläche. Die hohe Empfindlichkeit wird durch Spezialwiderstände mit $100\text{ M}\Omega$ ^[46] und sehr rauscharmen Operationsverstärkern von National Semiconductor^[63] erreicht.

Anhang C

Software

C.1 Frequenzgenerator

Nachfolgend ist der in TurboPascal7.0 verfaßte Quellcode für die Ansteuerung der digitalen Ausgänge der Meßkarte aufgelistet. Für ein besseres Verständnis ist zu jeder Zeile ein erklärender Kommentar angegeben:

```
PROGRAM LED01;

USES ML2TYPE, ML2BIB, ML2DEB, crt;

CONST
    CARDNUMBER = 0;                /* Kartennummer 0          */
    PC_IO_PORT = $2B8;            /* Basisadresse 2B8 Hex   */

procedure ErrorHandler;

var  err_rec  : ml2_error_info_type; /* Fehlerstruktur          */

begin
    ml2_get_error_info( err_rec );   /* Fehlerstruktur füllen  */
    writeln('Fehler Code   : ', err_rec.errorcode );
    writeln('Fehler Klasse : ', err_rec.errorclass );
    ml2_exit;                       /* Programmabbruch        */
    halt;
end;

var
    hDigOut0   : HML2;             /* Handle für IP-0        */
    hDigOut1   : HML2;             /* Handle für IP-4        */
    ValueOut0  : WORD;             /* Gelesener Wert von IP-0 */
    ValueOut1  : WORD;             /* Gelesener Wert von IP-4 */
    zahl       : CHAR;             /* Eingabe                 */
    error       : WORD;             /* Fehlervariable          */
    ok          : WORD;             /* Fehlervariable          */
    DIROS       : STR80;           /* String für OS-Name     */
    i,j         : longint;         /* Zählvariable           */
    setting     : WORD;

begin
    ml2_bib_startup( LANGUAGE_PASCAL ); /* Starten der Bibliothek mit
                                        /* Pascal Konventionen    */
```

```

DIROS := '\sorcus\ml2\osx\ML2-1D.*';
ok := ml2_reset( CARDNUMBER,                                { * Kartennummer * }
                PC_IO_PORT,                                { * Basisadresse * }
                0,                                         { * Mode = 0, ohne Interrupt und DMA * }
                7,                                         { * IRQ-Kanal * }
                0,                                         { * DMA-Kanal * }
                @ErrorHandler,                             { * Fehlerbehandlungsprozedur * }
                DIROS,                                     { * OS-Name * }
                10);                                       { * Timeout in Zehntelsekunden * }

if ok <> 0 then
  begin
    writeln('Fehlerklasse: ', ok shr 8);                    { * Bei Auftreten eines Fehlers * }
    writeln('Fehlercode:  ', ok AND $FF);                  { * wird dessen Nummer und Beschreibung * }
    ml2_exit;                                              { * ausgegeben. * }
    halt;                                                  { * Treiber für Multi-LAB/2 verlassen * }
  end;

hDigOut0:= ml2_open_channel( 0, ML2_OP_ALL, ML2_OP_ENABLE, error ); { * Fehlerübergabe ab* }
writeln(error);                                           { * Variable "error" * }

  for i:=0 to 1000000 do begin
    ml2_set_data( hDigOut0, 0 );
    ml2_set_data( hDigOut0, 1 );
  end;
  { * Aus- und sofortiges wieder Anschalten* }
  { * ohne Abfragen der Tastatur oder der * }
  { * Zeit für maximale Taktrate. * }

  { * for i:=0 to 10000 do begin
    Alternative Routine mit länger * }
    { * ml2_set_data( hDigOut0, 0 );
    Wartezeit zwischen den kurzen Pulsen * }
    { * for j:=0 to 10000 do begin end;
    * }
    { * ml2_set_data( hDigOut0, 1 );
    * }
    { * end;
    * }

  ml2_exit;
  { * Treiber für Multi-LAB/2 verlassen * }

end.

```

Lebenslauf in Kurzfassung

- Familiäres: Adrian Mahlkow, geboren am 3.12.1971 in Berlin
Eltern: Hartmut Mahlkow (Dipl.-Chem) und Karola Mahlkow (Kauffrau, Hausfrau)
verheiratet mit Sammia Mahlkow seit dem 9.8.1996
Kinder: Xenia (* 21.6.1999) und Linus (* 16.1.2001)
- Grundschule: Lindenhof-Grundschule in Berlin-Schöneberg/Tempelhof 1978-1984
- Oberschule: Rückert-Gymnasium in Berlin-Schöneberg 1984-1991, Abitur in Mathe, Physik, Politische Weltkunde, Kunst
- Studium: TU Berlin 1991-1998, Grundstudium mit Zusatzfächern Elektronik, Chemie, Technische Optik (Prof. Kross), HL-BE für Ingenieure
Hauptstudium (grundlagenorientierter Abschluß): Angewandte Physik (Prof. Bimberg), Theoretische Festkörperphysik (Prof. Richter), Theoretische Physik (Prof. Muschik), Quanten- und Korpuskularoptik (Prof. Eichler, Weber, Bostanjoglo), Neutronenstreuung (Steiner, HMI), ABWL I-III (Dr. Günther, et. al.), BWL für NÖ (Dr. Förster), Atom- und Molekülphysik (Prof. Zimmermann), Quantum Computing, Quanteninformaton (Prof. Hellwig), Innovationsmanagement (Prof. Trommsdorff). Ferienpraktika im MBI, HMI, Atotech, TU Dresden (Vakuumphysik). Seminararbeit im Optischen Institut über „Ionenfallen“ (Dr. Eichmann, MBI). Diplomarbeit bei Prof. Thomsen: „Ultrakurzzeitspektroskopie im Subpikosekundenbereich mittels Up-Conversion“ am Paul-Drude-Institut, Berlin, betreut vor Ort durch Prof. Grahm.
- Berufl. Werdegang: 04/1997 - 09/1999: Projektleiter bei der GfaI in Zusammenarbeit mit der OPTOSystem GmbH und dem OUT e.V.: „Entwicklung eines optoelektronischen Sicherheitssystems“ mit vier Mitarbeitern, gefördert im Programm FUEGO (BMW).
08/1999 - 07/2001: Projektleiter bei der OPTOSystem GmbH (Einzelprojekt): „Entwicklung einer Fertigungstechnologie für Einrichtungen zur Überwachung transparenter Materialien auf Bruch und Gefahrenstellen“, zum Teil gefördert durch das Land Berlin (FuE-Mittelstandsförderprogramm).
09/1999 - 07/2001: Projektleiter bei der SLI ML GmbH in Zusammenarbeit mit dem PDI, Berlin: „Entwicklung ultraheller integrierter Dünnschicht-Leuchtdioden auf GaN-Basis“, gefördert durch die IBB im Rahmen des Programmes „Informationsgesellschaft Berlin“.
03/2000 - 09/2001: Projektleiter beim OUT e.V. (Einzelprojekt): „Hochleistungs-Leuchtdiode“ mit zwei Mitarbeitern, gefördert durch PROInno, AiF (BMW).
03/2000 - 10/2001: Projektleiter bei SLI ML GmbH in Zusammenarbeit mit OUT e.V. und microtech electronic GmbH: „Technologieentwicklung zur Herstellung integrierter LED-Widerstandsbauelemente mit einheitlicher Lichtstärke“, gefördert im Rahmen des Programmes PROInno, AiF (BMW).
10/2002 - 02/2003: Projektleiter beim OUT e.V., Zusammenarbeit mit Andus Electronic GmbH: „Peripherie für die Hochleistungsleuchtdiode“, gefördert durch PROInno, AiF.
09/2002 - 08/2005: Projektleiter bei der OPTOSystem GmbH in Zusammenarbeit mit der Uni Erlangen/Nürnberg und SLS, Berlin: „Mikrolinse in Glas“, gefördert durch PROInno, AiF (BMW).