



Christian Mentin, BSc

**Analyse und Optimierung eines Lasermesssystems bezüglich der
Verwendung verschiedenster Lichtquellen unter Berücksichtigung von
physikalischen Effekten im optischen Pfad**

MASTERARBEIT

Zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Masterstudium Telematik

Eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Eugen Brenner
Institut für Technische Informatik

Graz, Jänner 2015

Eidesstaatliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Datum

Unterschrift

Kurzfassung

Das genaue Vermessen von Oberflächen und Objektkanten mit sub-Mikrometer Auflösungen spielt heute in vielen Anwendungen eine bedeutende Rolle. Bei Prozessen in welchen ein präzises automatisches Handling von empfindlichen Bauteilen- oder -gruppen notwendig ist, finden solche Hochpräzisionsmessgeräte ihre Anwendung. Die Masterarbeit ist die Weiterentwicklung eines optischen LED/Laser Kantenscanner Messgerätes zur genauen Vermessung von Objektkanten und Oberflächen. Ziel dieser Arbeit ist es, verschiedene Lichtquellen, wie beispielsweise LEDs und Laserdioden, hinsichtlich ihrer Abbildungseigenschaften zu evaluieren um in punkto erzielbarer Messgenauigkeit des Gerätes qualitative Aussagen treffen zu können. Dazu werden verschiedene Modelle des optischen Pfades entwickelt, Kantendetektions-Algorithmen mit aufgenommenen Referenz-Messdaten in MatLab implementiert und getestet, sodass diese in späterer Folge auf einem Mikrocontrollersystem implementiert werden können. Das Messprinzip beruht auf Mehrfachbelichtung und Projektion des zu vermessenden Objektes auf einen lichtempfindlichen Detektor, Auswerten der Belichtungsdaten zum Finden der Projektionskanten und Fusion der redundanten Messdateninformation zur Rückrechnung mit triangulierenden Methoden auf eine (X,Y) Position der Kante oder Kanten in einer 2D-Messebene. Werden ausreichend viele Lichtquellen verwendet, können dementsprechend mehrere Kanten eines Objektes redundant erkannt werden, und damit Informationen über die Beschaffenheit des Objektrandes erhalten werden. Das beinhaltet z.B. Messungen von Kantenposition, Materialdicke, Rückschlüsse auf Kantenausbrüche, etc.

Abstract

The precise measurement of object surfaces and edges with sub-micrometer resolution plays an important role in many applications nowadays. These high-precision measuring devices are used in processes where an accurate and automatic handling of sensitive parts or components is necessary. This master thesis is about the improvement of an optical LED/Laser edge scanning device which is used for accurate measuring of object-edges and surfaces. The thesis objective is the evaluation of different light sources, such as e.g. LEDs or Laserdiodes, with respect to their optical image projection properties, so that a qualitative proposition regarding the degree of measurement accuracy can be made. Therefore different optical path models are developed and edge-detection algorithms with measured reference datasets in MatLab implemented and tested, such that these datasets can be subsequently integrated on a selected microcontroller system. The measuring principle relies on multiple-exposure and projection of the object onto a light sensitive detector, furthermore on analyzing the exposure data to find the position of the projection edges and on the fusion of the redundant measuring data information in order to infer an edge position (X/Y) in the measurement plane with triangulation methods. If sufficient light sources are used, there is a possibility that multiple edges of an object can be detected at once using redundant exposure information. This multiple projection data can contain additional information about the object's edge condition. This includes e.g. measuring of the edge position, object thickness, edge fractions, etc.

Danksagung

Die Masterarbeit wurde im Studienjahr 2014 am Institut für technische Informatik an der Technischen Universität Graz durchgeführt.

Besonderer Dank gilt meinem Firmenbetreuer, Herrn Dr. Robin Priewald, welcher sich immer wieder mit seiner Erfahrung einbringen konnte und daher maßgeblich an den Problemlösungen beteiligt ist. Die nun vorliegenden Resultate sind das Ergebnis dieser intensiven sechsmonatigen Zusammenarbeit.

Nicht zuletzt möchte ich auch meinen Eltern dafür danken, dass sie mich nicht nur während der Schulzeit sondern auch während des Studiums immer unterstützt haben.

Herrn Professor Dr. Brenner möchte ich für die Chance danken, diese Arbeit mit Firmenkooperation am Institut wissenschaftlich behandeln zu können und ungelöste Probleme in einer weiterführenden Dissertation noch detaillierter betrachten zu dürfen.

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG	7
1.1. Motivation.....	8
1.2. Ziel der Arbeit	9
1.3. Aufbau dieses Dokuments.....	10
2. THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....	11
2.1. Optischer Pfad	13
2.1.1. Vereinfachtes optisches System.....	13
2.1.2. Eigenschaften von Lichtquellen.....	15
2.1.2.1. Geometrische Beziehungen.....	16
2.1.2.2. Lichttechnische Größen	17
2.1.3. Lichtquellen	20
2.1.3.1. LED	20
2.1.3.2. Laser und Laserdioden	22
2.1.4. Linseneffekte	24
2.1.4.1. Monochromatische Aberration	25
2.1.4.2. Chromatische Aberration.....	28
2.1.4.3. Weitere Linsenfehler	28
2.1.5. Weitere parasitäre Beeinflussungen des optischen Pfades.....	29
2.2. Kantendetektion und Positionsbestimmung	31
2.2.1. Geometrische Abbildung einer Kante	33
2.2.2. Beugung von Licht an einer Kante.....	34
2.2.3. Positionsbestimmung im X/Y Messfeld	40
2.3. Signal-Verarbeitung und Konditionierung.....	42
2.3.1. Analoge Signalverarbeitung.....	42
2.3.1.1. CCD Sensoren.....	43
2.3.1.2. CMOS Sensoren	47
2.3.1.3. Vergleich von CCD und CMOS Sensoren.....	48
2.3.2. Analoge Signalkonditionierung.....	49
2.3.3. Digitale Signalverarbeitung	53
2.3.3.1. DSP Systeme.....	55

3. SYSTEMÜBERBLICK.....	58
3.1. Softwarekomponenten	58
3.2. Hardwarekomponenten	59
3.2.1. Verfügbare Sensoren	61
3.2.2. Verfügbare Lichtquellen	63
3.2.2.1. LED	63
3.2.2.2. Laserdioden.....	69
3.2.3. Analoge Signalkonditionierung.....	73
3.3. Messungen im Labor	75
3.3.1. Beeinflussungen des Systems durch Linsen	75
3.3.2. Speckle Noise eines Lasers auf einem CCD Sensor.....	76
3.3.3. Projektion einer Kante auf einen CCD Sensor (Laserlichtquelle)	77
3.3.4. Projektion einer Kante auf einen CCD Sensor (LED Lichtquelle)	79
3.3.5. Belichtung des CCD Sensors (TSL1410) mit verschiedenen Lichtquellen.....	80
3.4. Anforderungen und Verbesserungspotentiale	81
4. LÖSUNGSANSÄTZE UND IMPLEMENTIERUNG	83
4.1. Grundidee.....	83
4.2. Algorithmen.....	84
4.2.1. Kalibrierung des Systems.....	84
4.2.2. Kantendetektion	86
4.2.3. Modelle des optischen Pfades.....	88
4.2.3.1. Modell des Sensors	88
4.2.3.2. Modell für eine Laserlichtquelle	89
4.2.3.3. Modell für eine LED Lichtquelle.....	92
4.3. Ergebnisse	94
4.3.1. Ergebnisse mit Laserdioden.....	94
4.3.2. Ergebnisse mit einer LED	96
5. ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK.....	100
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	102
LITERATURVERZEICHNIS.....	105

1. Einleitung

Optische Messsysteme finden heute in vielen verschiedenen Industriebereichen ihre Anwendung, denn oft ist es notwendig, nicht nur schnell und hochpräzise, sondern auch berührungsfrei verschiedenste Objektparameter zu ermitteln.

Diese können in vielen Prozesssteuerungen oder auch zur Qualitätssicherung eingesetzt werden. Anwendung finden solche Systeme beispielsweise bei Festigkeitsmessungen, bei denen sich Materialien im Mikrometerbereich verformen oder auch um den Rundlauf von Achsen zu erkennen. Des Weiteren werden mit diesen auch sicherheitskritische Prozessbereiche überwacht. Aus diesem Grund spielt oftmals auch funktionale Sicherheit bei der Konzeptionierung solcher Systeme eine große Rolle.

Das grundsätzliche Messprinzip eines optischen Messsystems ist denkbar einfach. Es wird mit einer oder mehreren Lichtquellen ein Objekt beleuchtet und dann dessen Schattenwurf auf, bzw. reflektiertes Licht zu einem Detektor ausgewertet, um gesuchte Objektparameter bestimmen zu können.

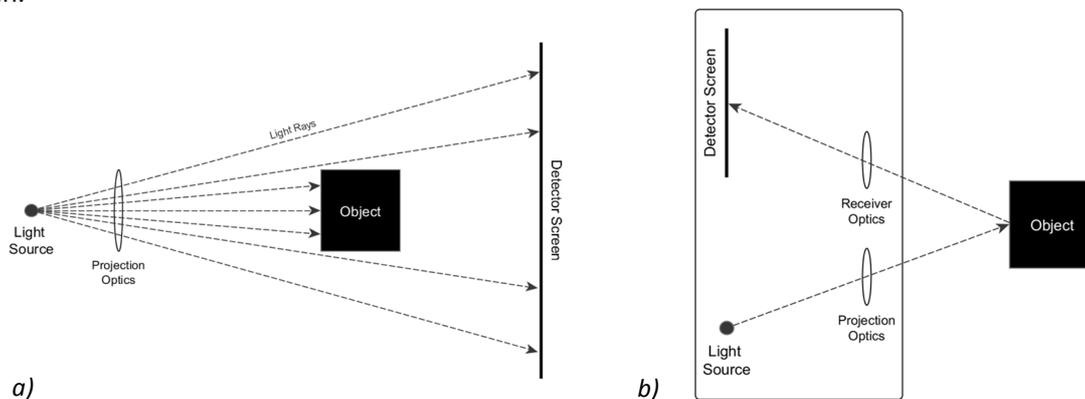


Abb. 1 - Optische Messprinzipien

Um einige Beispiele zu nennen, könnten folgende Objektparameter für verschiedene Anwendungen von Interesse sein:

- Profil, Dimension, Oberfläche
- Abstand, Position
- Dicke, Durchmesser
- Vibration

Messgeschwindigkeiten von mehr als 50000 Messungen pro Sekunde sowie Auflösungen im Mikrometer Bereich und darunter sind nach aktuellem Stand der Technik ohne weiteres möglich, werden jedoch durch die verwendeten Einzelkomponenten stark begrenzt. So spielen für die erzielbare maximale Messgeschwindigkeit nicht nur Auflösung des Sensors und Verarbeitungsgeschwindigkeit des eingesetzten DSP Systems eine wichtige Rolle, sondern auch der Lichtquellentyp und die damit verbundene Lichtleistung. Je stärker die Lichtquelle das Objekt beleuchtet desto kürzer können die Belichtungszeiten am Sensor gehalten werden.

Mittlerweile gibt es unzählige Hersteller, welche in verschiedensten Preis-, Genauigkeits- und Geschwindigkeitsklassen, sowie mit den unterschiedlichsten Schnittstellen wie z.B.: Ethernet, CAN

RS485 etc. solche Systeme anbieten. Dabei kommen je nach Anforderung verschiedene Messmethoden zum Einsatz. Einerseits kann es sinnvoll sein mit direkt vom Messobjekt reflektiertem Licht zu arbeiten, da das Messgerät sehr kompakt konstruiert werden kann, weil Lichtquelle und Sensor in einer Ebene liegen. Andererseits gibt es aber unzählige Objekte, welche eine solche Anordnung aufgrund ihrer Oberflächenbeschaffenheit nicht erlauben.

Da mit dem Projektpartner, der Firma BRS¹ das Anwendungsszenario schon festgelegt wurde, beschränkt sich diese Arbeit auf die Messmethode, in welcher Lichtquelle und Sensor in einigem Abstand zueinander in zwei Ebenen platziert sind, sodass das Messobjekt zwischen diesen zu liegen kommt (Abb. 1a).

1.1. Motivation

Wie bereits erwähnt gibt es mittlerweile unzählige Hersteller von optischen Messsystemen. Meist sind diese aber aufgrund geringer Stückzahlen, aufwändiger Fertigungsprozesse und komplizierter mehrstufiger Optik sehr teuer.

Wenn optische Messsysteme in Hinsicht auf Preis und Performance den Anforderungen der Halbleiterindustrie genügen, kann hier ein großes Marktpotential entstehen, denn ein besonders großes Anwendungsgebiet hat sich in der Halbleiterindustrie zur Qualitätssicherung ergeben. Siliziumwafer werden aus Kostengründen immer größer, um eine höhere Ausbeute an IC's erzielen und dadurch kostengünstiger produzieren zu können. Wafergrößen von weit über 300mm (Abb. 2) werden heute schon in den modernen Waferfabriken serienweise verarbeitet. Zudem ist es notwendig, besonders für Wafer in Dünnschichttechnologie, welche sich aufgrund ihrer Größe sehr stark verwinden können, neue Transportkonzepte und Qualitätssicherung nach und zwischen den einzelnen Prozessschritten zu erproben, um die Ausbeute zu erhöhen. Beispielsweise kann in jedem Fertigungsschritt ein Wafer auf Randausbrüche kontrolliert werden und damit schon sehr früh im Fertigungsprozess ein Problem erkannt werden. IC Ausbeuten von weniger als 50% werden heute von vielen Herstellern im ersten Jahr nach Einführung einer neuen Technologie toleriert, könnten aber durch richtige Qualitätssicherung während einzelner Prozessschritte deutlich gesteigert werden.



Abb. 2 - 300mm Dünnschicht Wafer²

Andere direkte Anwendungsgebiete für das entwickelte Messsystem sind derzeit auch zur Messung der Spannung von Transportbändern oder in der Papierindustrie angedacht, um diese immer mit der richtigen Spannkraft zu belasten.

Als ganz persönlichen Motivationsgrund möchte ich noch hinzufügen, dass ich die Firma BRS sowie das vorhandene optische Messsystem schon seit langem kenne und schon diverse Vorgängerprototypen der Elektronikkomponenten während meiner Studienzeit entworfen und zum Teil mitentwickelt habe.

¹ <http://www.bright-red-systems.com>

² [Infineon Technologies Dünnschichtwafer Technologie](#)

1.2. Ziel der Arbeit

Grundsätzlich hat sich diese Arbeit zum Ziel gesetzt, die aktuelle Hardware des optischen Messsystems (Abb. 56), welche schon größtenteils vor Beginn dieser Arbeit vorbereitet wurde, hinsichtlich der Messgenauigkeit zu verbessern. Dazu ist es notwendig, den optischen Pfad genau zu analysieren und modellieren, sodass Effekte, welche durch die Verwendung von nicht idealen Lichtquellen und Optiken entstehen, entsprechend berücksichtigt werden können.

Dabei soll vor allem die Auswirkung von verschiedenen Lichtquellentypen und Optiken auf die Genauigkeit des Systems analysiert werden. Speziell LED- und Laserlichtquellen sollen nicht nur hinsichtlich der erzielbaren Messgenauigkeit, sondern auch hinsichtlich ihrer Verarbeitbarkeit für ein Serienprodukt verglichen werden.

Das Einsatzgebiet des zu optimierenden optischen Messsystems erfordert die genaue Bestimmung der Objektposition. Etwas genauer betrachtet handelt es sich eigentlich um die Position der Objektkante, welche Aufschlüsse auf die Lage des Objektes in einer 2D Messebene zulässt (2.2.3. Positionsbestimmung im X/Y Messfeld).

Schlussendlich soll eine Auflösung von wenigen Mikrometern mit einer Geschwindigkeit von 8000 Messungen pro Sekunde erzielt werden. Dazu sind momentan folgende Komponenten verfügbar:

- Steuerelektronik für bis zu 8 Lichtquellen
- PCB's mit verschiedenen Lichtquellen
- CCD Zeilensensor mit 1280 Pixel
- ARM Cortex Microcontroller System mit RS232 Schnittstelle
- MatLab GUI zum automatisierten Aufnehmen von Testdaten

Geplant sind zuerst einige Tests mit verschiedenen Lichtquellen im optischen Labor und einer anschließenden Auswertung der Ergebnisse in MatLab. Dabei sind Überlegungen zur Kalibrierung des Messsystems anzustellen und robuste Algorithmen zur Kantendetektion zu entwerfen. Wenn möglich sollen diese in späterer Folge auch am Mikrocontrollersystem implementiert und getestet werden.

Parallel zur Entwicklungsphase der Algorithmen sollen die benötigten PCB's in Zusammenarbeit mit BRS neu konzeptioniert und erstellt werden, sodass Messungen im EMV Labor damit durchgeführt werden können. Daher müssen schon bei der Konzeptionierung der neuen Elektronik geltende Produktnormen berücksichtigt werden.

Am Ende der Arbeit soll ein nahezu verkaufsreifes Messsystem stehen, welches den Anforderungen des Kunden genügt.

1.3. Aufbau dieses Dokuments

Das Dokument beschreibt in fünf Kapiteln das Design und die Implementierung eines optischen Messsystems zur Ermittlung der Kantenposition eines Objektes, sowie die dabei auftretenden Probleme.

In Kapitel 2 werden die notwendigen Grundlagen erarbeitet um die aktuellen Probleme, welche bei versuchten Lösungsansätzen in Kapitel 4 unweigerlich auftreten, verstehen zu können. Dabei werden die wichtigsten Details herausgegriffen und die Problematiken, wenn möglich, an Hand von Simulationen und Beispielen verdeutlicht.

Des Weiteren werden in Kapitel 3 die wichtigsten Systemkomponenten herausgegriffen und erklärt. Dazu werden, um einen Überblick über die Komplexität eines solchen Messsystems geben zu können, einige Implementierungsdetails für dieses System etwas genauer beschrieben. Anhand von Messungen, welche im optischen Labor von BRS durchgeführt wurden, werden die in den theoretischen Grundlagen herausgearbeiteten Modelle und Simulationen, sowie die erwarteten Probleme mit praktischen Implementierungsbeispielen verglichen.

An Hand der vorhandenen Komponenten und gewonnen Erkenntnisse durch die Labormessungen werden dann in Kapitel 4 konkrete Implementierungsvarianten mit LED- und Laserlichtquellen vorgestellt. Diese werden näher beschrieben und miteinander hinsichtlich der erzielbaren Messgenauigkeit verglichen.

Eine Zusammenfassung der Implementierung und der Ergebnisse sowie Vorschläge für weiterführende Arbeiten sind im Schlusskapitel 5 des Dokuments zusammengefasst.

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Abschnitt werden kurz die Grundlagen vorgestellt, welche notwendig sind um die Probleme, die bei der praktischen Umsetzung mit optischer Erkennung einer Objektposition entstehen, verstehen und lösen zu können.

Dazu unterteilt sich das Messsystem in folgende Teilbereiche, welche gesondert betrachtet werden:

- **Optischer Pfad**
 - Lichtquelle
 - Projektionsoptik
 - Objektkantenbeschaffenheit
- **Lichtempfindlicher Sensor mit analogem Interface**
 - Belichtungswert als analoge Ausgangsspannung für jedes Pixel
 - Messsignalverarbeitung
- **Digitalisierung und Signalverarbeitung**
 - AD Wandlung des Sensor Signals
 - Signal-Analyse und Verarbeitung

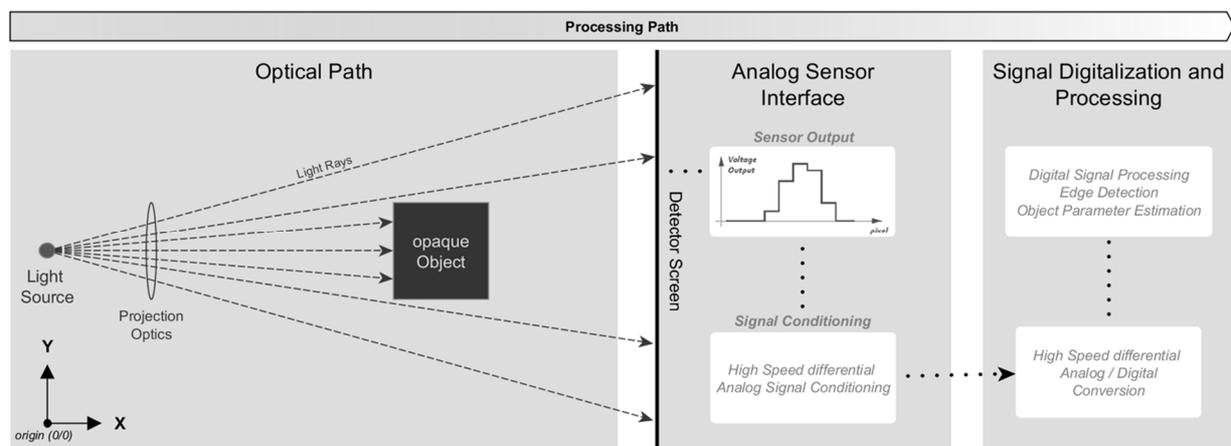


Abb. 3 - Grundlegendes Messprinzip

Die notwendigen Schritte zur Bestimmung der Objektposition sind recht einfach erklärt:

Optischer Pfad

Zuerst wird das zu vermessende Objekt, respektive dessen Kanten, mit einer Lichtquelle auf einen Sensor abgebildet. Ob dabei eine Projektionsoptik verwendet werden muss, wird in erster Linie nur durch den verwendeten Lichtquellentyp und dessen Lichtleistung bestimmt. Die Verwendung einer Projektionsoptik ermöglicht durch Fokussierung des Lichtstrahls auf den Sensor höhere Beleuchtungsstärken auf diesen, welche zu kürzeren Belichtungszeiten führen. Dadurch kann beispielsweise Bewegungsunschärfe, wie sie bei schnell bewegten Objekten entstehen würde, verringert werden.

Durch die Einbringung eines lichtundurchlässigen Objektes in den optischen Pfad entsteht ein Schattenwurf am Sensor.

Lichtempfindlicher Sensor mit analogem Interface

Die Helligkeitswerte der einzelnen Sensorpixel werden in Form von analogen Spannungen am Sensorausgang repräsentiert. Aus Kostengründen erfolgt das Auslesen einer gesamten Sensorzeile meist seriell, wobei das Ausgangssignal durch entsprechende Signalkonditionierung schon in der analogen Domäne aufbereitet wird.

Digitalisierung und Signalverarbeitung

Danach wird mit einem schnellen Analog-Digital-Umsetzer zur weiteren Verarbeitung die analoge Sensorspannung, welche den Helligkeitswert repräsentiert, digitalisiert. Dies ist für jedes Pixel des Sensors durchzuführen und muss daher auch besonders schnell geschehen, um die geforderten Messgeschwindigkeiten erreichen zu können.

Die eigentliche Positions- bzw. Kantenbestimmung erfolgt mit digitaler Signalverarbeitung im Mikrocontrollersystem. Durch die Detektion einer Kante mit zwei Lichtquellen kann eine zweidimensionale Position der Objektkante bestimmt werden. Voraussetzung dafür ist natürlich, dass die Lage des Sensors zu den Lichtquellen bekannt ist.

2.1. Optischer Pfad

Der Optische Pfad kann, wie in Abb. 3 ersichtlich, durch eine Lichtquelle, eine eventuell verwendete Projektionsoptik, welche durch eine oder mehrere Linsen gebildet wird, und den grundlegenden Eigenschaften der Lichtausbreitung beschrieben werden.

Nicht ideale Bauelemente, dies gilt für Linsen sowie für Lichtquellen gleichermaßen, sowie Toleranzen in der Fertigung von diesen, lassen keine rein analytische Modellierung zu. Vielmehr ist es notwendig, durch Versuche und Messungen die entstehenden Probleme zu erkennen und ein Modell des optischen Pfades zu entwickeln, welches diesen am besten beschreibt.

Um ein passendes Modell finden zu können, wurden daher etliche Messungen in einem Labor vorgenommen und verschiedenste Ansätze zur Modellierung des optischen Pfades betrachtet. Nachfolgend sind einige theoretische Betrachtungen dazu angestellt, welche dem Leser dieser Arbeit mit einigen anschaulichen Simulationen und Beispielen die zu erwartenden Probleme näherbringen sollen.

2.1.1. Vereinfachtes optisches System

Das vereinfachte optische System besteht nur aus einer Lichtquelle und einem zu vermessenden Objekt, welches lichtundurchlässig ist. Außerdem wird angenommen, dass dieses weitestgehend frei von parasitären Einflüssen ist.

Die Abbildung eines Objektes, bzw. dessen Kanten auf einen Sensor kann grundsätzlich durch die Verwendung verschiedener Modelle der Lichtausbreitung³ berechnet werden:

I. Geometrische Optik (*Strahlenoptik*)

- Geradlinige Lichtausbreitung, keine Berücksichtigung von Beugungseffekten
- Verwendet Fermat's Prinzip der Reflexion und Brechung
- Einfach zu berechnen und daher für Berechnung von abbildenden Systemen geeignet

II. Physikalische Optik (*Wellenmodell*)

- Beruht auf der Annahme, dass sich Licht als Welle ausbreitet
- Reflexion, Brechung, Beugung und Interferenz können damit beschrieben werden
- Komplexere mathematische Berechnungen notwendig
- Anwendung des Huygens-Fresnel-Prinzips führt zu mathematischen Modellen der Lichtausbreitung
 - Fresnel Beugung
 - Fraunhofer Beugung

³ Gekürzter Auszug aus [10]

III. Quanten Optik

- Licht wird in Form von Photonen modelliert, welche Wellen- als auch Teilchen-charakteristik besitzen
- Muss verwendet werden, um die Interaktion von Licht und Materie analysieren zu können
- Erklärt die Emission von Laserlicht und photoelektrische Effekte in Sensoren

Die drei angeführten Modelle unterscheiden sich sowohl in der Komplexität der Berechnung als auch in der Genauigkeit der Lösungen. Daher wurden in der Implementation unterschiedliche, an die verschiedenen Probleme angepasste Modelle verwendet. Diese werden in den Abschnitten 2.2. und 4.2.2. noch detaillierter beschrieben.

Da geometrische- sowie Wellenmodelle für den Erfolg dieser Arbeit von größter Bedeutung sind, wurden mit MatLab Simulationen von verschiedenen Modellen durchgeführt und die Ergebnisse in den nachfolgenden Kapiteln passend dokumentiert.

Wird ein *geometrisches Modell* verwendet, kann ein Schattenwurf auf einen entfernten Sensor durch einfache geometrische Zusammenhänge berechnet werden. Dabei wird angenommen, dass sich Licht nur geradlinig ausbreitet und dadurch nicht in der Lage ist, in den Schatten eines lichtundurchlässigen Objektes einzudringen. Mit der Voraussetzung dass die Lichtquelle punktförmige ist, existiert eine denkbar einfache Lösung (Abb. 4). Teile des Sensors werden, aufgrund der Vernachlässigung von Ausbreitungscharakteristika der verwendeten Lichtquelle (siehe 2.1.2.), entweder mit voller Helligkeit oder gar nicht beleuchtet.

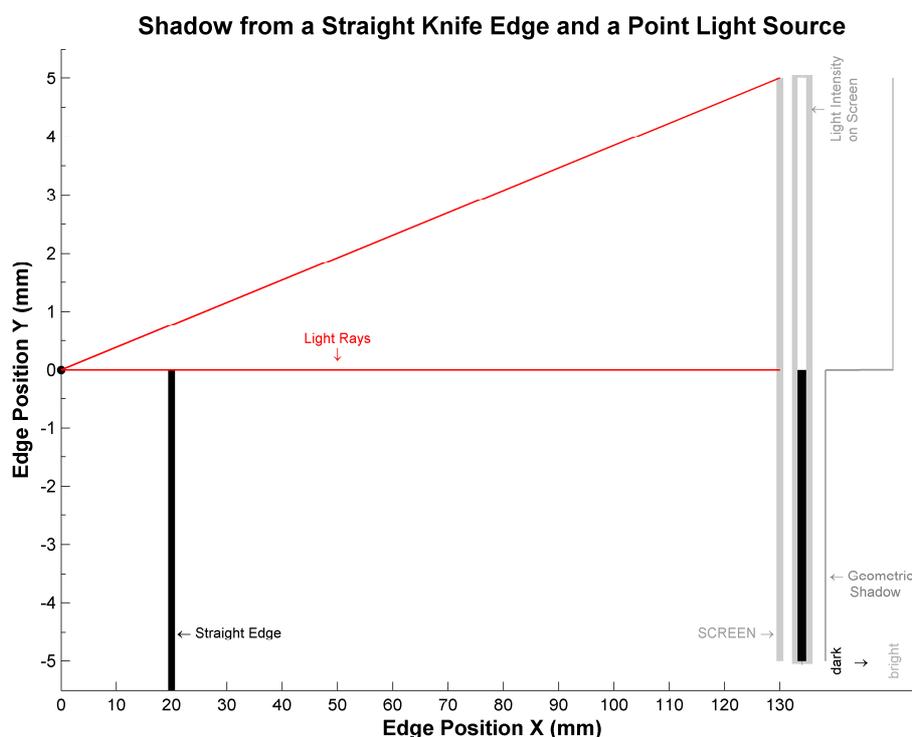


Abb. 4 - Geometrische Abbildung einer Kante bei Belichtung mit einer punktförmigen Lichtquelle

Dieses recht einfache Beispiel zeigt aber auch schon recht deutlich, dass diese Modellierung in der Praxis eher wenig Verwendung finden wird, da einerseits die Lichtquelle niemals punktförmig sein kann und zumindest bei Laserlicht mit weiteren physikalischen Nebeneffekten zu rechnen ist.

Da es aber jahrelange Erfahrung und fundierte Optik Kenntnisse benötigt, um genaue Modelle des Typs II und III für das vorliegende Problem zu erstellen, wird in dieser Arbeit versucht, bestehende Modelle und Implementierungen solcher zu verwenden und wenn möglich anzupassen. Das Ziel besteht darin ein Modell zu finden, welches die Wirklichkeit mit all den im optischen Pfad auftretenden, parasitären Effekten bestmöglich und mit hinreichender Genauigkeit beschreibt.

2.1.2. Eigenschaften von Lichtquellen

Lichtquellen können sich in vielerlei Hinsicht voneinander unterscheiden. Größe der lichtemittierenden Fläche, verwendetes Material und emittiertes Spektrum sind nur wenige Parameter, welche bei jeder Lichtquelle unterschiedlich sind. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten lichttechnischen Größen und Abhängigkeiten kurz erläutert⁴, sowie die für die Anwendung relevanten Lichtquellen etwas detaillierter betrachtet.

Ganz grundsätzlich kann festgestellt werden, dass es sich bei Licht, sofern man es als Welle betrachtet, nur um elektromagnetische Strahlung eines konkreten Wellenlängenbereichs handelt, welcher im menschlichen Auge Helligkeitsempfindungen hervorruft.

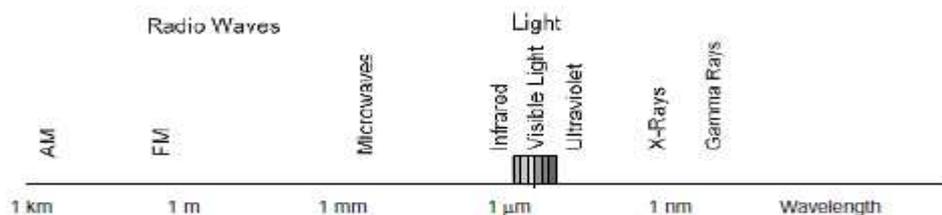


Abb. 5 - Bezeichnung von Wellenlängenbereichen im Elektromagnetischen Spektrum [1]

Gleichzeitig kann Licht mit Materie interagieren, sodass es zum Energieaustausch der Photonen mit Materie kommt. Dies ist auf den Teilchencharakter zurückzuführen, wobei jedes Photon entsprechend seiner Wellenlänge bzw. Frequenz und seiner Ausbreitungsgeschwindigkeit (Lichtgeschwindigkeit c) eine bestimmte Photonenenergie besitzt. Bei Lichtquellen handelt es sich häufig nicht nur um Quellen, welche Strahlung mit nur einer einzigen Wellenlänge emittieren, auch monochromatische Strahlungsquellen genannt, sondern um solche, welche einen kontinuierlichen spektralen Verlauf besitzen.

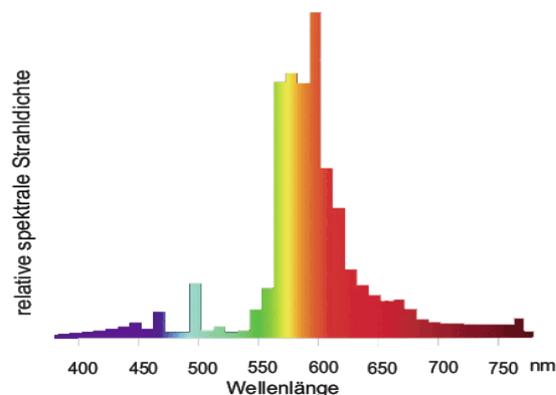


Abb. 6 - Lampenspektrum einer Natriumdampf-Hochdrucklampe (OSRAM) [2]

⁴ Zusammenfassung von Kapitel 2 aus [2]

Wird optische Strahlung von Materialien absorbiert, so wirkt diese in den einzelnen Wellenlängenbereichen unterschiedlich. Dieser Einfluss wird mit der spektralen Empfindlichkeit $s(\lambda)$, der sogenannten Wirkungskurve beschrieben (Abb. 7).

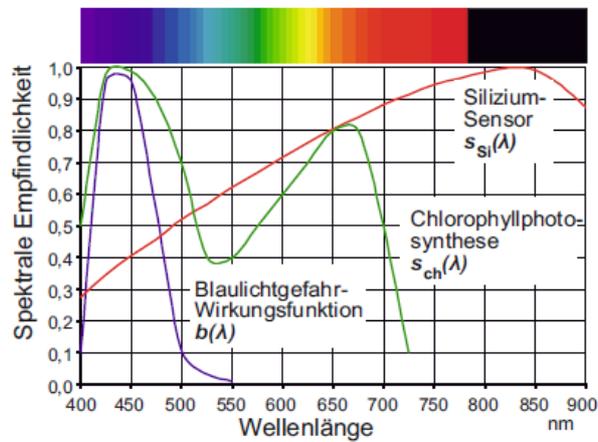


Abb. 7 - Verschiedene spektrale Wirkungsfunktionen [2]

2.1.2.1. Geometrische Beziehungen

J.H. Lambert zeigte schon im 18. Jahrhundert, dass bei Berechnung von Strahlungsbeziehungen die projizierten Flächen A_P verwendet werden müssen (Abb. 8a).

$$A_P = A_{a..d} \cdot \cos(\gamma) \text{ bzw. } dA_P = dA_{a..d} \cdot \cos(\gamma)$$

Der Raumwinkel (Abb. 8b) ist als das Verhältnis des Ausschnitts einer Kugelfläche A_{kk} zum Quadrat des Radius r definiert und bekommt zur Kennzeichnung den Anhang von Ω_0 (Einheitsraumwinkel) und als Einheit Steradian (sr). Mit dem Winkel γ ergibt sich die Raumwinkelprojektion, d.h. die Projektion der Kugelfläche A_{kk} in die Ebene, die durch γ bestimmt ist (A_{PKk}). Diese ergibt sich also zu:

$$\Omega_{Kk} = \pi \cdot \sin^2 \gamma \cdot \Omega_0$$

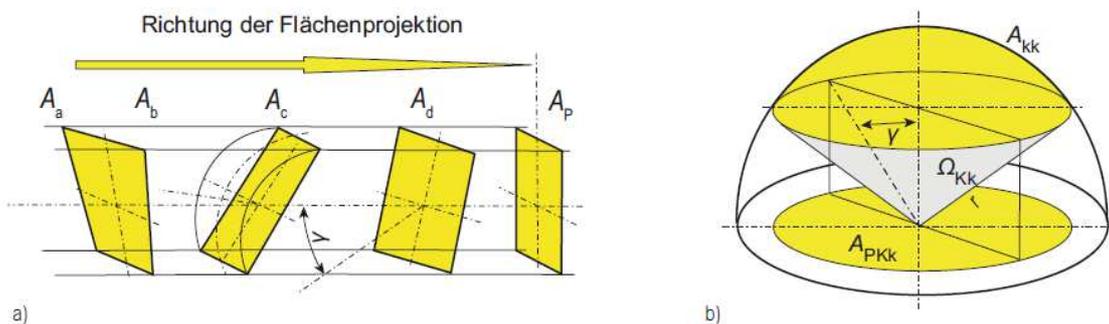


Abb. 8 - Mögliche Flächenprojektionen (a) und Raumwinkel einer Kugelkappe (b) [2]

2.1.2.2. Lichttechnische Größen

Lichttechnische Größen sind spektral bewertete Größen deren Bewertung nach einer genormten Helligkeitsempfindungsfunktion $v(\lambda)$ für das Tagessehen des menschlichen Auges erfolgt. Interessant dabei ist, dass je nach Leuchtdichte des Lichts andere Bereiche des Auges (Stäbchen, Zäpfchen) unterschiedlich stark auf dieselben Wellenlängen reagieren. In der nachfolgenden Abb. 9 sind für verschiedene Leuchtdichten ($v'(\lambda) < 10^{-5} \text{cd/m}^2$, entspricht sehr niedriger Leuchtdichte, fast Dunkelheit; $v_{eq}(\lambda) = 10^{-5} \text{cd/m}^2 - 10^2 \text{cd/m}^2$, entspricht Dämmerung; $v(\lambda) > 10^2 \text{cd/m}^2$, entspricht Tagessehen) die spektralen Empfindlichkeiten des Auges angeführt. Zur Bewertung wird aber jedenfalls nur die Empfindlichkeit für das Tagessehen $v(\lambda)$ herangezogen.

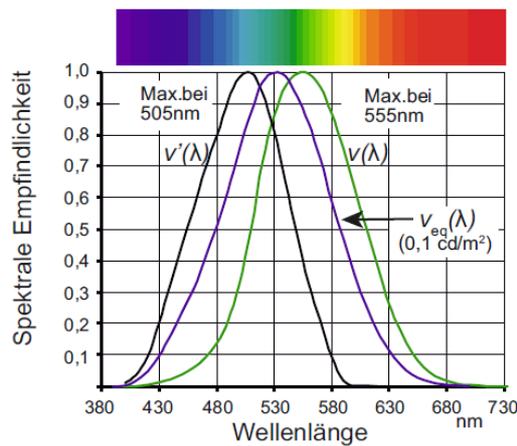


Abb. 9 - Spektrale Empfindlichkeit, Helligkeitsempfindungsfunktion [2]

Lichtstrom Φ

Der Strahlungsaustausch zwischen einer leuchtenden und einer beleuchteten Fläche erfolgt nach dem photometrischen Grundprinzipien von Lambert. Der Lichtstrom $d^2\Phi_{1,2}$, der auf der Fläche dA_2 auftrifft, ist:

$$d^2\Phi_{1,2} = \left(L(\gamma_1) \cdot dA_1 \cdot \cos\gamma_1 \cdot dA_2 \cdot \frac{\cos\gamma_2}{r^2} \right) \cdot \Omega_0$$

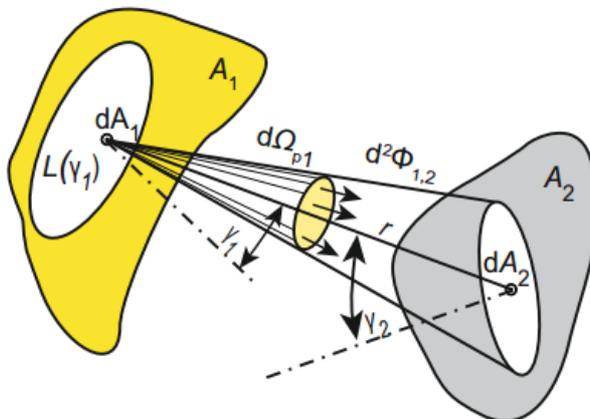


Abb. 10 - Beziehungen beim photometrischen Grundgesetz [2]

Lichtstärke I

Die Lichtstärke $I(\gamma_1)$ ist der Lichtstrom $d^2\Phi_{1,2}$, der in ein Raumwinkelement $d\Omega_1$ eingestrahlt wird. Die Einheit der Lichtstärke ist Candela (cd).

$$I(\gamma_1) = \frac{d^2\Phi_{1,2}}{d\Omega_1}$$

Die Verteilung der Lichtstärke wird in Polarkoordinaten angegeben (Abb. 11a). Je nach Schnittauswahl werden verschiedene Lichtstärkeverteilungskörper (LKV) angegeben. Die gebräuchlichste Darstellung ist die C-Ebenen Darstellung (Abb. 11b).

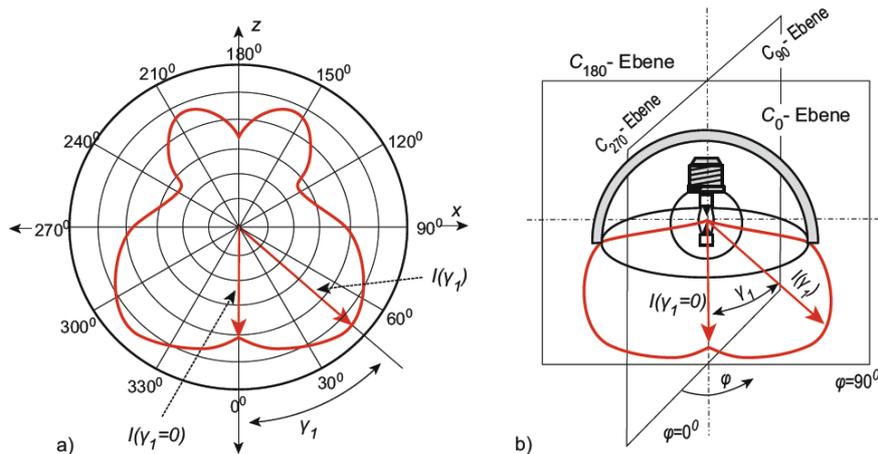
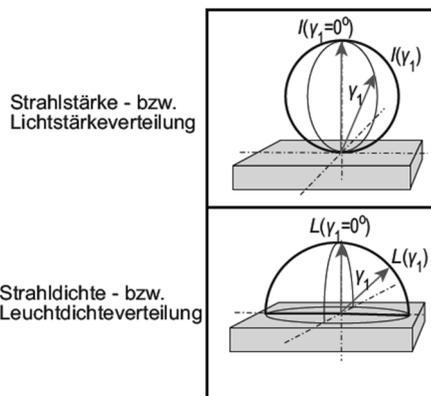


Abb. 11 - Lichtstärkeverteilungskurven und ihre Darstellung in ausgewählten Ebenen [2]

Leuchtdichte L

Die Leuchtdichte ist der Lichtstromanteil $d\Phi_{1,2}$, welcher von einer projizierten Fläche dA_{p1} in ein Raumwinkelement $d\Omega_1$ eingestrahlt wird und besitzt als Einheit Candela (cd)/m².

$$L(\gamma_1) = \frac{d\Phi_{1,2}(\gamma_1)}{d\Omega_1} \cdot dA_1 \cdot \cos(\gamma_1) \text{ bzw. } L = \frac{dI(\gamma_1)}{dA_1} \cdot \cos(\gamma_1) = \frac{dI(\gamma_1)}{dA_{p1}}$$



Für einen Elementarstrahler ist die in Lichtstärke- und Leuchtdichteverteilungen in der nachfolgenden Abbildung dargestellt. Ein Lambertstrahler besitzt die Eigenschaft, dass die Leuchtdichte von allen Richtungen aus gesehen konstant bleibt. Dies ist durch folgende Lichtstärkeverteilung gegeben:

$$I(\gamma_1) = I(\gamma_1 = 0^\circ) \cdot \cos(\gamma_1)$$

Abb. 12 - Eigenschaften eines Lambertstrahlers [2]

Beleuchtungsstärke E

Die Beleuchtungsstärke ist der pro Fläche auftreffende Lichtstrom und wird in Lux angegeben. 1lx entspricht demnach 1lm/m².

$$E(\gamma_2) = \frac{d^2\Phi(\gamma_1)}{dA_2}$$

Für kleine leuchtende Flächen berechnet sich die Beleuchtungsstärke in einem Punkt P nach dem photometrischen Entfernungsgesetz, wie auch in Abb. 13 zu erkennen ist.

$$E(\gamma_2) = E(\gamma_2 = 0^\circ) \cdot \cos(\gamma_2)$$

Aus der Beleuchtungsstärkeverteilung eines Flächenrasters kann der Nutzlichtstrom Φ_N berechnet werden, der auf die Gesamtfläche trifft. Dieser wird auch bei Projektoren als ANSI-Lichtstrom bezeichnet.

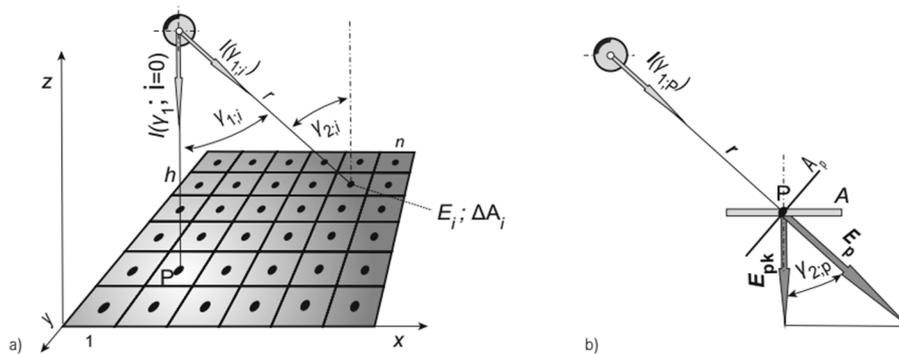


Abb. 13 - Beleuchtungsstärkeberechnung unter einer punktförmigen Lichtquelle (a) und Beleuchtungsstärkevektor (b) [2]

Belichtung H

Bei den meisten Lichtwirkungen spielt die Belichtungszeit eine maßgebliche Rolle. Daher kann dies durch zeitliche Integration der Beleuchtungsstärke berücksichtigt werden.

$$H = \int_0^T E(t) \cdot dt$$

2.1.3. Lichtquellen

Grundlage für die Leistungsfähigkeit des Messsystems ist die Auswahl einer geeigneten Strahlungsquelle zur Aussendung von Licht, deren Auswertung auf einem lichtempfindlichen Sensor elektrische Signale erzeugt, welche proportional der Belichtung sind. In diesem Abschnitt werden, speziell aufgrund von Leistungsaufnahme und Baugröße, LED- und Laserlichtquellen genauer betrachtet⁵.

Je nach Art der Energieumwandlung unterscheidet man Temperatur- und Lumineszenzstrahler. Erstere sind beispielsweise Glühlampen, welche sehr einfach betrieben werden können und ein kontinuierliches Spektrum besitzen. Jedoch wird dabei auch Strahlung in nicht benötigten Frequenzbereichen emittiert und damit nur ein Teil der eingesetzten Energie in sichtbare Strahlung umgewandelt. Lumineszenzstrahler hingegen (z.B.: Gasentladungslampen, Leuchtdioden, Laser) können in gewissen Spektralbereichen hohe Strahlungsleistungen, bei nur geringer Temperaturentwicklung erzielen, da die Zwischenstufe der Umwandlung von Strahlungsenergie in thermische Energie nicht benötigt wird.

2.1.3.1. LED

Ein elektrisches Feld bewirkt eine Ladungstrennung am pn-Übergang der Diode. Die bei den Rekombinationsvorgängen freigesetzte Energie wird in Form von Strahlung emittiert. Je nach eingesetztem Halbleitermaterial variiert die emittierte Wellenlänge der Strahlung. Die emittierte Strahlung ist meist auch sehr schmalbandig und der Quantenwirkungsgrad kann bis zu 100% erreichen. Jedoch wird dieser aufgrund von elektrischen (Kontakt- und Materialwiderstände) und optischen Verlusten (Absorption und Reflexion) stark verringert und kann in Extremfällen sogar unter den Wirkungsgrad einer Glühlampe sinken.

Durch Integration der Halbleiterdiode in einen Kunststoffmantel können einerseits Reflexionen vermindert werden (Verminderung des Brechzahlssprungs), andererseits kann man durch die Form und Streueigenschaften des Kunststoffes die Abstrahleigenschaften der Diode stark beeinflussen. Dadurch wird es möglich, beliebige Abstrahlwinkel zu realisieren (Abb. 15).

Vorteile einer LED liegen insbesondere in der, durch den Aufbau bestimmten, meist aber sehr hohen möglichen Modulationsfrequenz (100MHz), sehr hoher Impulsbelastbarkeit (bei Impulsdauern von typischerweise weniger als 1µs), welche die erlaubte Dauerleistung um ein Vielfaches überschreiten kann, sowie einer langen Lebensdauer von oft weit mehr als 10 Jahren.

Eine kleine Abstrahlfläche des Halbleiters ergibt bei Verwendung von nicht streuenden Materialien eine nahezu punktförmige Lichtquelle, welche bei hoher Stromdichte und entsprechendem geometrischem Aufbau (Resonator) in einen Halbleiterlaser übergeht. Eine typische Baugröße einer LED ist in Abb. 14 ersichtlich. Die Licht emittierende Fläche, also der Halbleiter alleine, ist meist quadratisch und besitzt, je nach Leistungsklasse, eine Seitenlänge von unter 0,1mm bis zu mehreren Millimetern.

⁵ Gekürzte Zusammenfassung von Kapitel 6 aus [2]

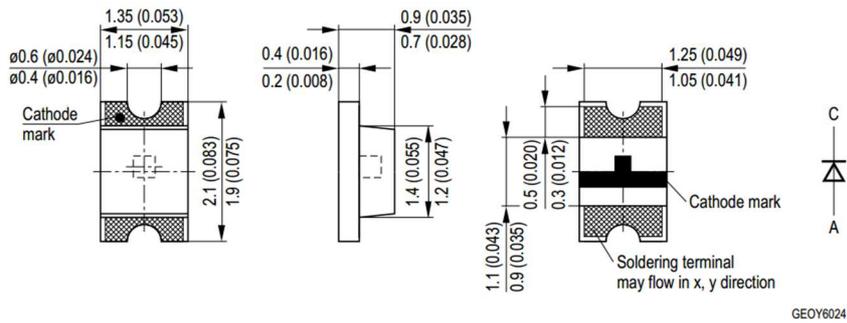


Abb. 14 - LED - typische Baugröße⁶

Für viele Anwendungen kann man daher eine LED meist als punktförmige Lichtquelle betrachten, jedoch kann es notwendig sein, dass in bestimmten Belichtungssituationen die Größe des Halbleiters berücksichtigt werden muss.

Weiters liegt die emittierte spektrale Bandbreite einer LED zwischen 30nm und ca. 100nm. Eine rein monochromatische Auswertung von Belichtungsdaten auf einem Sensor bei der Verwendung von LEDs muss daher gut überlegt sein, denn auch durch eventuell notwendige Optiken treten aufgrund dieser Tatsache zusätzliche chromatische Fehler auf (2.1.4.2. Chromatische Aberration).

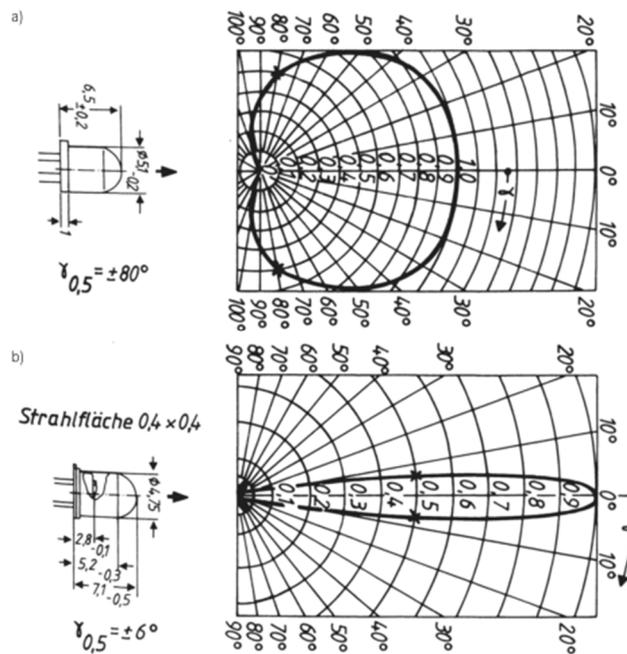


Abb. 15 - LED Abstrahlcharakteristik [2]

Als I_0 wird die Strahlstärke unter dem Winkel $\gamma = 0^\circ$ bezeichnet. Die Halbwertsbreite ($\Delta\lambda_{0,5}$) ist in Abb. 15 gekennzeichnet und befindet sich zwischen den Punkten, bei welchen der spektrale Strahlungsfluss auf die Hälfte seines Maximalwertes abgesunken ist.

⁶ <http://www.osram-os.com>

2.1.3.2. Laser und Laserdioden

Einer der größten Vorteile einer Laserdiode⁷ gegenüber einer herkömmlichen LED ist, dass der lichtemittierende Punkt, durch den Aufbau eines Halbleiterlasers bedingt, nur wenige μm Durchmesser besitzt (hohe räumliche Kohärenz). Laserstrahlung besitzt aufgrund ihrer sehr geringen spektralen Bandbreite (weniger als 1nm, bis zu 5nm) ebenfalls eine hohe zeitliche Kohärenz. Diese Eigenschaften können bei anderen Typen von Lichtquellen zwar auch mit sehr schmalbandigen optischen Filtern und kleinen Blendenöffnungen erreicht werden, durch beide Maßnahmen wird jedoch die emittierte Strahlung stark abgeschwächt. Für Halbleiterlaser nimmt die Emissionswellenlänge bei Temperatur- bzw. Leistungsanstieg zu. Bei Halbleiterlasern werden Monitordioden direkt schon am selben Halbleiter wie die Laserdiode integriert, um die optische Leistung mit sogenannten Lasertreibern konstant halten zu können.

Der Wirkungsgrad eines Lasers ist aufgrund seines Aufbaus mit optischem Resonator höher als bei einer LED. Er liefert kohärente Wellenfelder mit gleichzeitig hoher Intensität. Prinzipiell sind auch beim Laser die emittierten Wellenlängen abhängig von Material und Aufbau. In der Praxis können Laser mit Wellenlängen von UV- bis hin zu Infrarotstrahlung realisiert werden.

Um die Funktionsweise eines Lasers zu verstehen, muss man ganz grundsätzlich zwischen *spontaner* und *induzierter Emission* unterscheiden. Wird ein Elektron angeregt (auf einen energetisch höheren Energiezustand gebracht) so fällt dieses von alleine, aber spontan (ca. 10^{-8}s), unter Aussendung eines Photons, wieder in seinen ursprünglichen Energiezustand zurück, wobei die emittierte Wellenlänge direkt mit der Energiedifferenz der zwei Zustände zusammenhängt. Bei induzierter Emission stimuliert eine ankommende Lichtwelle ein bereits angeregtes Atom, sodass eine ausgesendete Welle dieselbe Phase, Richtung, Frequenz und Polarisation besitzt und dadurch die ursprüngliche Welle verstärkt.

Prinzipiell hängt es von den Besetzungsdichten verschiedener Energieniveaus ab, ob Emission oder Absorption stattfindet. In der nachfolgenden Abb. 16 ist induzierte Emission dargestellt, die einfallende Lichtwelle wird sozusagen verstärkt, wenn die Laserbedingung (Inversion oder Besetzungsumkehr liegt vor, wenn $N_2 > N_1$) erfüllt ist.

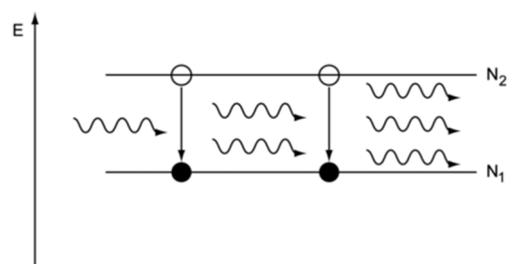


Abb. 16 - induzierte Emission [2]

Daher benötigt ein Laser nicht nur spezielle Materialien, welche es ermöglichen Elektronen auf den höheren angeregten Energieniveaus möglichst lange zu halten und nicht sofort durch spontane Emission wieder zu verlieren, sondern auch einen richtigen optischen Aufbau (optischer Resonator)

⁷ Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation: Laser

mit Spiegeln (optische Rückkopplung) um eine hohe Verstärkung zu erreichen. Dadurch wird die meiste Strahlung auch nur längs einer Achse emittiert (Abb. 17).

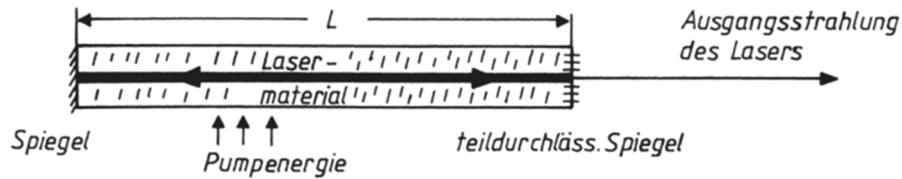


Abb. 17 - Aufbau eines Lasers mit der Resonatorlänge L [2]

Bei Halbleiterlasern dienen die Endflächen des Kristalls als Spiegel und bilden somit den Resonator. Wenn man den Laserstrahl im Querschnitt betrachtet kann man in gewissen Bereichen Helligkeitsunterschiede feststellen. Diese transversalen Moden werden durch die Zahl der Knoten in x - und y - Richtung beschrieben (TEM_{xy})⁸ und maßgeblich durch den Resonator beeinflusst. Speziell bei Halbleiterlaserdioden können schon bei der Abstrahlung der Grundmode TEM_{00} mehrere longitudinale Moden auftreten (geringe Kohärenzlänge durch die Mischung unterschiedlicher Wellenlängen). Durch hohe Leistungen bedingt durch den Laseraufbau, lassen sich jedoch auch Single Mode Laser realisieren.

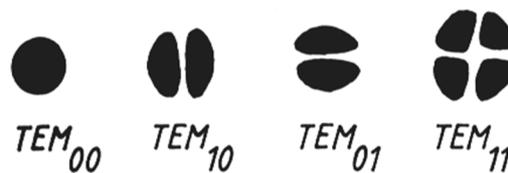


Abb. 18 - verschiedene Lasermoden [2]

Das Qualitätskriterium, wie parallel sich die Strahlen vom Laser ausbreiten, kann anhand von Radius und Divergenzwinkel des Laserstrahls in der Grundmode beurteilt werden.

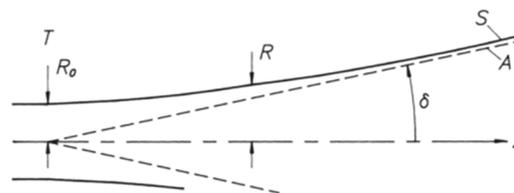


Abb. 19 - Radius der Taille (R_0), Radius in einem Abstand z (R), Divergenzwinkel δ [2]

Bei Halbleiterlasern ist der Divergenzwinkel sehr groß und muss daher durch Kollimatorlinsen begrenzt werden. Prinzipiell ist man daher bestrebt, die gesamte Lichtenergie mit Linsensystemen dorthin zu fokussieren, wo diese benötigt wird. Dass die Verwendung von Linsen jedoch Probleme mit sich bringt wird im nächsten Kapitel 2.1.4. Linseneffekte veranschaulicht.

In der nachfolgenden Abb. 20 wurde ein Blatt Papier mit einer Laserdiode (RLD2WMFR1) beleuchtet. Dabei ist die ausgeprägte Lasermode gut zu erkennen. Zusätzlich dazu lässt sich Speckle Noise erkennen, welches sich durch die hohe Kohärenz des Lichts auf einer unebenen Fläche stark ausbildet.

⁸ TEM – Transversal Electromagnetic Mode

Diese unangenehme Eigenschaft wird natürlich auch im realen System auf einem lichtempfindlichen Detektor sichtbar und muss mit passender Signalverarbeitung berücksichtigt werden.

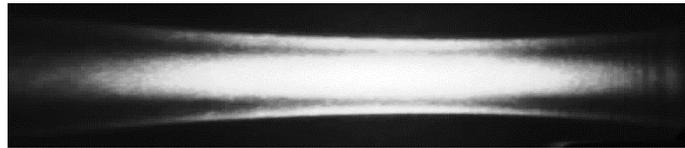


Abb. 20 - Belichtung mit einer Laserdiode

2.1.4. Linseneffekte

Da Leuchtdichteverteilungen von Lichtquellen oft rotationssymmetrisch, oder zumindest nicht nur stark in eine einzige Hauptrichtung ausgeprägt sind (Lasermode), besteht der Wunsch, in dem genannten Aufbau des Messsystems mit einer Sensorzeile den gesamten Lichtstrom, sprich also das gesamte von einer Lichtquelle emittierte Licht, auf diese zu fokussieren. Denn nur wenn die Belichtung stark genug ist, können die Belichtungszeiten minimal gehalten werden. In Abb. 21 ist die Lichtstärkeverteilung einer kleinen Lichtquelle ohne und mit Optik zu sehen.

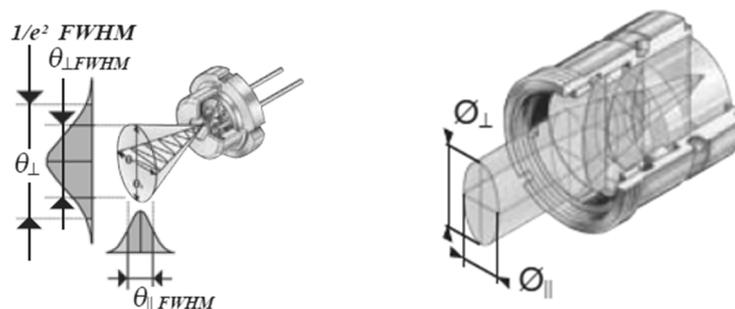


Abb. 21 - Typische Ausbreitungscharakteristik einer Lichtquelle ohne und mit Linsenelementen (Kollimator Linsensystem) [12]

Die Idee bei Verwendung von Linsensystemen besteht darin, die verfügbare Lichtenergie auf die Sensorzeile mit der Länge L und der Breite B so gut als möglich zu fokussieren.

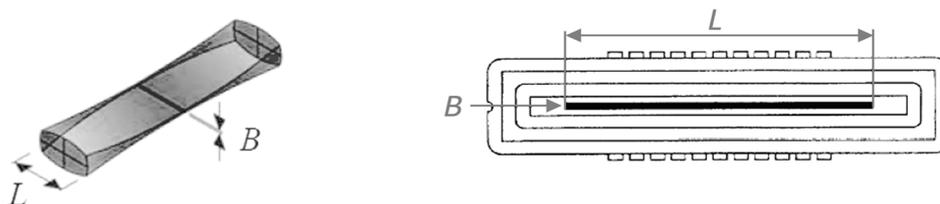


Abb. 22 - Fokussierung des Laserstrahls auf die Breite einer CCD Zeile [3]

Leider gibt es aber durch die Verwendung von Linsen und Linsensystemen jedoch einige zusätzliche Effekte, welche je nach Art der Beeinflussung das Messergebnis respektive das projizierte Schattenbild einer Kante so stark beeinflussen, sodass die durch eine oder mehrere Linsen erzielbaren Vorteile wieder zunichte gemacht werden. Diese, durch die Linsengeometrie und Wellenlängenabhängigkeit des Brechungsindex auftretenden Abweichungen, werden Abbildungsfehler oder Aberrationen genannt und in diesem Abschnitt etwas genauer betrachtet⁹.

2.1.4.1. Monochromatische Aberration

Als monochromatische Aberration bezeichnet man Fehler, welche auch bei einfarbigem Licht, d.h. Licht mit nur einer Wellenlänge auftreten, also nicht von Dispersionseffekten abhängen. Da die meisten Lichtquellen, welche für dieses Messgerät verwendet werden sehr schmalbandig sind, ist damit zu rechnen, dass Dispersionseffekte vernachlässigt werden können.

Sphärische Aberration

Die Sphärische Aberration, oder auch Öffnungsfehler genannt, wird durch die Linsenform erheblich beeinflusst. Sphärisch geschliffene Linsen brechen achsennahe bzw. achsenferne Strahlen so, dass diese sich nicht im selben Brennpunkt schneiden. Je nachdem welche Ebene man betrachtet spricht man von Längs- oder Queraberration (manchmal auch Lateralaberration). Beide Größen beschreiben jedoch denselben Effekt.

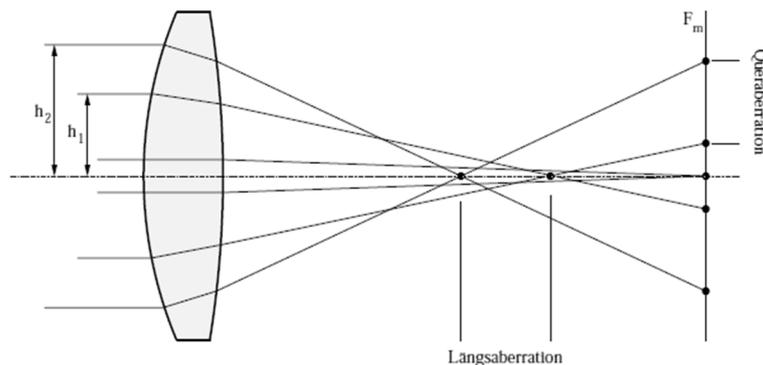


Abb. 23 - Sphärische Aberration einer Sammellinse [3]

Je nach Anwendung gibt es Linsen, welche durch spezielle Form über Teilbereiche der Linse oder auch über den gesamten Abbildungsbereich ein von sphärischer Aberration freies Bild erzeugen können.

Koma

Trifft ein Lichtbündel schräg entlang der optischen Achse auf die Linse auf, so entsteht Koma. Dies ist auch für Linsen der Fall, welche schon sphärisch korrigiert sind.

⁹ Zusammenfassung von Kapitel 4 aus [2]

Daher wird oft der Eintrittswinkel von Strahlbündeln begrenzt, oder auch die Linsenform wenn möglich angepasst, da sich Koma von der Durchbiegung von Einzellinsen beeinflussen lässt.

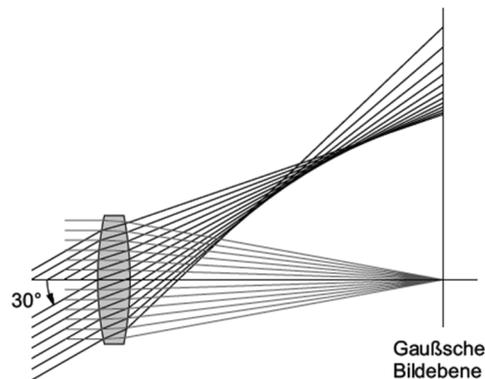


Abb. 24 - Koma einer sphärisch korrigierten Linse zeigt sich für schräg einfallende Strahlbündel [2]

Für optisch dünne Linsen¹⁰ und unter Einhaltung gewisser Randbedingungen, kann Koma verschwinden.

Astigmatismus

Astigmatismus ist ein Schärfefehler, welcher durch schräg einfallende Strahlbündel hervorgerufen wird. Er zeichnet sich dadurch aus, dass an zwei getrennten Orten Bildlinien auftreten. Je nach Krümmung der Linse entstehen zwei Bildschalen, welche sich in der optischen Achse im Paraxialbildpunkt berühren.

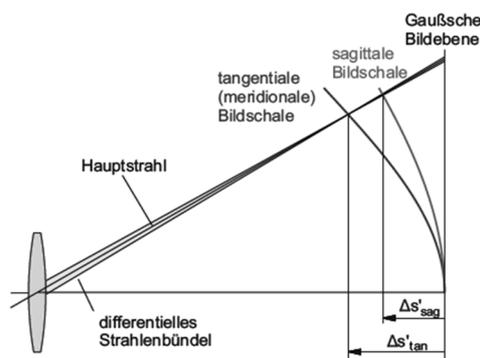


Abb. 25 - Grafische Darstellung der astigmatischen Bildschalen [2]

Der Astigmatismus $\Delta s'_{ast} = \Delta s'_{tan} - \Delta s'_{sag}$ ist bei einfachen Linsen von der Linsendurchbiegung, bzw. dem Formfaktor und dem Blendenort abhängig. Durch geschickte Linsenauswahl ist es jedoch möglich, dass die beiden Bildschalen nahezu deckungsgleich aufeinander fallen und dadurch der Astigmatismus minimal wird.

Nichtideale Linsen, welche nicht rotationssymmetrisch um die optische Achse sind, bilden auch achsparallele Strahlen astigmatisch ab. Es existieren je nach Einfallsebene der Strahlbündel (tangential oder sagittal) zwei Brennlinien. Dieser Effekt wird dann axialer Astigmatismus genannt (siehe Abb. 26).

¹⁰ Ist die Dicke der Linsen klein gegenüber den Krümmungsradien der Linsenflächen, so spricht man von dünnen Linsen.

Glaslinsen sind heute jedoch schon so präzise rotationssymmetrisch gefertigt, dass zumindest dieser Effekt vernachlässigt werden kann.

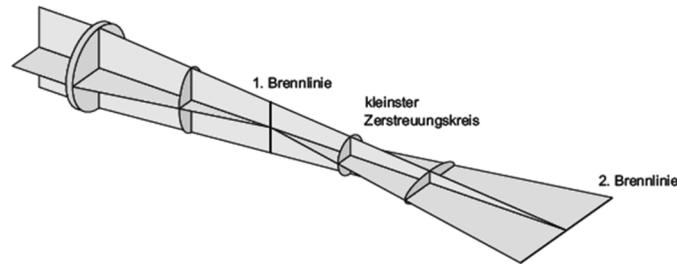


Abb. 26 - axialer Astigmatismus verursacht durch nichtideale Linseneigenschaften [2]

Bildfeldwölbung

Wie schon beim Astigmatismus bemerkt wurde, ist die Abbildungsebene mehr eine gekrümmte Bildfeldschale als eine planare Fläche (siehe Abb. 25). Zur Behebung dieses Fehlers, auch Bildfeldebuchtung genannt, können dicke Meniskuslinsen eingeführt werden, welche eine Krümmung besitzen, die dem ursprünglichen Fehler entgegengesetzt wirkt. Optische Systeme, die weder Astigmatismus noch Bildfeldwölbung aufweisen, werden Anastigmaten bezeichnet.

Verzeichnung

Die Verzeichnung oder auch Vignettierung genannt, ist ein Bildmaßstabsfehler, welcher bewirkt, dass Strukturen in Bild- und Objektfeld nicht mehr geometrisch ähnlich sind. Dabei spielt der Abstand eines Objektpunktes zur optischen Achse eine vorrangige Rolle. Grundsätzlich kann dabei aber auch zwischen tonnenförmiger und kissenförmiger Verzeichnung unterschieden werden (siehe Abb. 27).

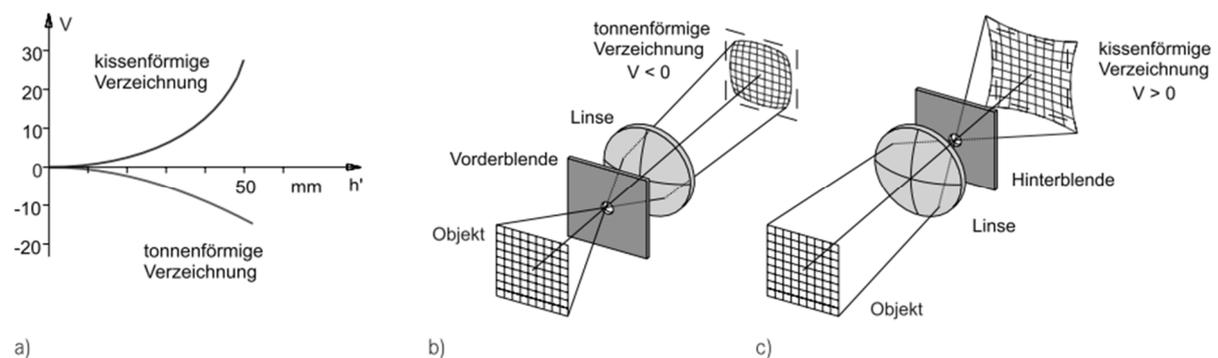


Abb. 27 - tonnenförmige (b) und Kissenförmige (c) Verzeichnung [2]

Linien welche durch die Bildmitte abgebildet werden und nicht nahe der optischen Achse sind, werden gekrümmt wiedergegeben. Durch symmetrische Linsenanordnung mit einer Mittenblende kann dieser Effekt jedoch kompensiert werden und man erhält verzeichnungsfreie Abbildungen.

2.1.4.2. Chromatische Aberration

Da der Brechungsindex in einem Material wellenlängenabhängig ist, resultiert daraus, dass verschiedene Wellenlängen andere Brennweiten besitzen.

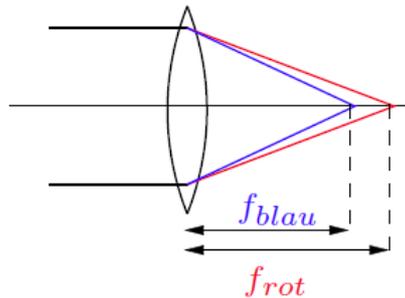


Abb. 28 - Prinzip der Chromatischen Aberration [4]

Dabei unterscheidet man zwischen verschiedenen Fehlern, welche durch chromatische Aberration verursacht werden:

Farbvergrößerungsfehler

Der Farblängsvergrößerungsfehler beschreibt die Differenz der Brennweiten welche an einer Linse durch verschiedene Wellenlängen verursacht werden (Abb. 28).

Farbquerfehler

Der Farbquerfehler entsteht in der Bildebene und wird auch dort bemessen. Prinzipiell steht dieser in engem Zusammenhang mit dem Farblängsvergrößerungsfehler, kann aber auch bei korrigiertem Farblängsvergrößerungsfehler auftreten.

Farblängsfehler

Der Farblängsfehler ist die chromatische Schnittweitendifferenz. Auch diese Fehler können durch spezielle Kombinationen von Linsen, sogenannte Achromate, verringert und teilweise komplett kompensiert werden. Bei optischen Systemen ist die chromatische Aberration meist unerwünscht, jedoch kann diese zumindest in dieser Anwendung bei der Fokussierung eines Lichtstrahls vermutlich vernachlässigt werden.

2.1.4.3. Weitere Linsenfehler

Zusätzlich zu den, durch die Linsengeometrie auftretenden Fehlern, gibt es noch weitere, welche von großer Bedeutung sind und die Abbildungsleistung des Systems stark verschlechtern. Damit ist gemeint, dass es durch diese ungewünschten Nebeneffekte, mitunter unmöglich werden kann, durch einfache Linsenkombinationen den Lichtstrahl ausreichend gut zu fokussieren. Qualitativ hochwertige Linsen oder spezielle Linsenformen, welche all diese Fehler minimieren, sind zwar verfügbar, schließen sich aber ob des hohen Preises und der Verfügbarkeit für dieses Projekt aus.

Wellenfrontaberration

Durch Weglängenunterschiede der sich durch die Optik ausbreitenden Wellen kommt es zu Interferenzerscheinungen der Wellen in der Abbildungsebene.

Herstellungsfehler

Da fertigungsbedingt jede Linse Toleranzen besitzt und nicht zu 100% gleich gefertigt werden kann, sind die Abbildungseigenschaften zusätzlich durch folgende Fehler beeinflusst:

- *Materialfehler*: Brechzahl und Dispersionsfehler, Materialinhomogenitäten (beispielsweise Schlieren und Blasen);
- *Bearbeitungsfehler*: Radien und Dickenfehler, Fehler der Flächenform, Dezentrierungen, Polierfehler und Kratzer;
- *Montagefehler*: Abstand benachbarter Systemgruppen, Kippungen und Dezentrierungen;

Sofern die Rotationssymmetrie erhalten wurde, können Fertigungsfehler durch meist einfache Systemanpassungen (wie z.B.: Anpassung der Luftabstände) korrigiert werden. Mit abnehmenden Abbildungsfehlern, sprich mit zunehmender optischer Abbildungsleistung, werden die Herstellungstoleranzen erheblich enger. Schlussendlich liegt es aber in der Hand des optischen Designers die Linsensysteme so auszulegen, dass gewisse Herstellungstoleranzen toleriert werden können.

2.1.5. Weitere parasitäre Beeinflussungen des optischen Pfades

Licht hat die Eigenschaft, sich in verschiedenen Materien anders zu verhalten, da es zu einer Wechselwirkung des Lichtes mit stofflicher Materie kommt. Dabei treten Reflexion, Transmission, Absorption, Streuung oder Emission auf. Diese Wirkungen können mit Licht- bzw. strahlungsphysikalischen Stoffkennzahlen beschrieben werden. Da die Stoffkennzahlen wellenlängenabhängig sind, müssen diese spektral bewertet werden.

Ganz allgemein werden Lichtstrom-(Grade) oder Leuchtdichteverhältnisse (Faktoren) verwendet. Die nachfolgende Abb. 29 gibt einen kurzen Überblick über Stoffkennzahlen. Dabei sind Grade immer auf den Lichtstrom, welcher auf ein Material trifft, und Faktoren auf die Leuchtdichte eines idealen nach Lambert wirkenden Materials (diffus streuendes Weiß, bei einem Reflexionsgrad von 1) bezogen.

	Reflexion	Transmission	Absorption
Grade	Reflexionsgrad $\rho = \Phi_\rho / \Phi$	Transmissionsgrad $\tau = \Phi_\tau / \Phi$	Absorptionsgrad $\alpha = \Phi_\alpha / \Phi$
Faktoren	Leuchtdichtefaktor (Remissionsgrad) $\beta_\rho = L_\rho / L_{\text{weiß}}$	Leuchtdichtefaktor (Transluzenzgrad) $\beta_\tau = L_\tau / L_{\text{weiß}}$	

Abb. 29 - Definition der Reflexions-, Transmissions- und Absorptionsgrade [2]

Daher kann hier festgestellt werden, dass idealerweise für den Messaufbau, die Kante möglichst lichtundurchlässig ist, und gleichzeitig der optische Pfad so wenig als möglich durch weitere optische Bauelemente beeinflusst wird, um möglichst viel Licht auf den Sensor zu bringen.

Leider treten, wie schon in 2.1.4.3. angemerkt, durch Einschlüsse von Verschmutzungen und anderen Herstellungsfehlern in optischen Bauteilen Abschattungs- bzw. auch Beugungseffekte auf, welche die Kantenprojektion auf den Sensor verfälschen. Weitere Informationen zu den Beeinflussungen im realen System durch verwendete Linsensysteme sind in 3.3. Messungen im Labor angeführt.

2.2. Kantendetektion und Positionsbestimmung

Um die gewünschte Objektposition relativ zum Koordinatensystem unseres Messgerätes bestimmen zu können, wird versucht die Position der Objektkante möglichst genau zu ermitteln. Dabei wird durch Projektion eines Schattens auf einen linearen CCD Sensor, welcher durch Belichtung mit einer beliebigen Lichtquelle entsteht, die Kantenposition bestimmt. Dadurch beschränkt sich der aktive Messbereich in erster Linie schon durch die Sensorlänge, denn der Schatten muss am Sensor zu liegen kommen. In den nachfolgenden Punkten wird veranschaulicht, dass nicht nur die Position der Objektkante den Schattenwurf beeinflusst, sondern dieser auch vom Lichtquellentyp und deren Charakteristik stark beeinflusst wird.

Da nach erfolgter Digitalisierung der Sensordaten ein eindimensionaler Wertevektor mit den Helligkeitswerten der einzelnen Pixel vorliegt, können diese im Prinzip wie ein Bild mit nur einer einzigen Zeile interpretiert werden. In Abb. 30 illustriert ein Bild eines RGB CMOS Kamerasensors diesen Zusammenhang. Dazu wurde aus dem ursprünglich 6016x4000 Pixel großen Bild eine Zeile extrahiert, denn dies entspricht derselben Belichtung, welche auch ein einzeliger CCD Sensor, wengleich auch mit entsprechend niedrigerer Ortsauflösung, erfahren würde.



Abb. 30 - Projektion einer Kante auf einen RGB Sensor (Bildausschnitt 6016x1 Pixel)

Aus diesem Grund möchte ich in diesem Kapitel, ohne in der ersten Überlegung schon Modelle zur Lichtausbreitung zu verwenden, kurz auf eine grundlegende Fragestellung in der Bilddatenverarbeitung eingehen.

Was ist eine Kante überhaupt, wie entsteht Sie und wie kann diese in den Daten gefunden werden?

Kanten in Bildern entstehen aufgrund verschiedener Faktoren und Einflüsse wie beispielsweise durch Diskontinuitäten in

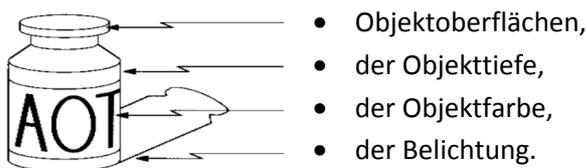


Abb. 31 -
Ursprung von Kanten [5]

Um nun Kanten in vorhandenen Bildern finden zu können, existieren viele verschiedene Detektoren, welche sich jedoch meist eine entscheidende Eigenschaft einer Kante zu Nutze machen. Der Gradient der Helligkeit eines Bildes ist bei Kanten immer besonders stark ausgeprägt. Bei digitalen eindimensionalen Bildern kann dieser daher besonders leicht berechnet werden,

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f(x_{n+1}, y) - f(x_n, y)}{\Delta x}$$

da dies einer einfachen Faltungsoperation der Daten mit einem Faltungskern der Form [-1,1] entspricht. Nachfolgende Abb. 32 zeigt den Gradientenverlauf eines Graustufenbildes. Graustufen

repräsentieren nur den zur Kantendetektion benötigten Helligkeitswert eines jeden Pixels und enthalten keine Farbinformationen.

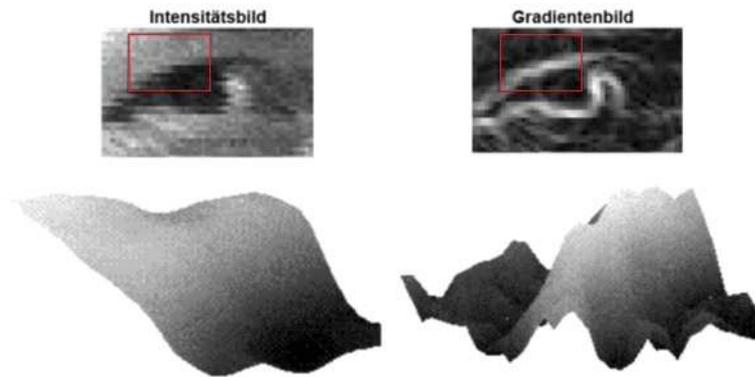


Abb. 32 - Helligkeits- und Gradientenverlauf in einem Bild [5]

Betrachtet man nun das Gradientenbild (Abb. 32) sieht man, dass die exakte Position der Kante zwar irgendwo in der Nähe der Maxima liegen wird, jedoch eine genauere Beschreibung des Kantenbildes respektive der Schattenprojektion einer Objektkante benötigt wird, um die genaue Position der Kante feststellen zu können. Genau dazu werden Modelle benötigt, welche diese Schattenprojektion möglichst genau beschreiben, um die exakte Position der Kante bestimmen zu können.

2.2.1. Geometrische Abbildung einer Kante

Das schon in 2.1.1. erwähnte, sehr einfache geometrische Modell mit punktförmiger Lichtquelle wurde im ersten Schritt zur Simulation auf ein Modell mit einer Lichtquelle, deren Durchmesser 0.5mm beträgt erweitert. Wie in Abb. 33 und Abb. 34 zu erkennen ist, beruht die geometrische Abbildung auf rein geometrischen Zusammenhängen.

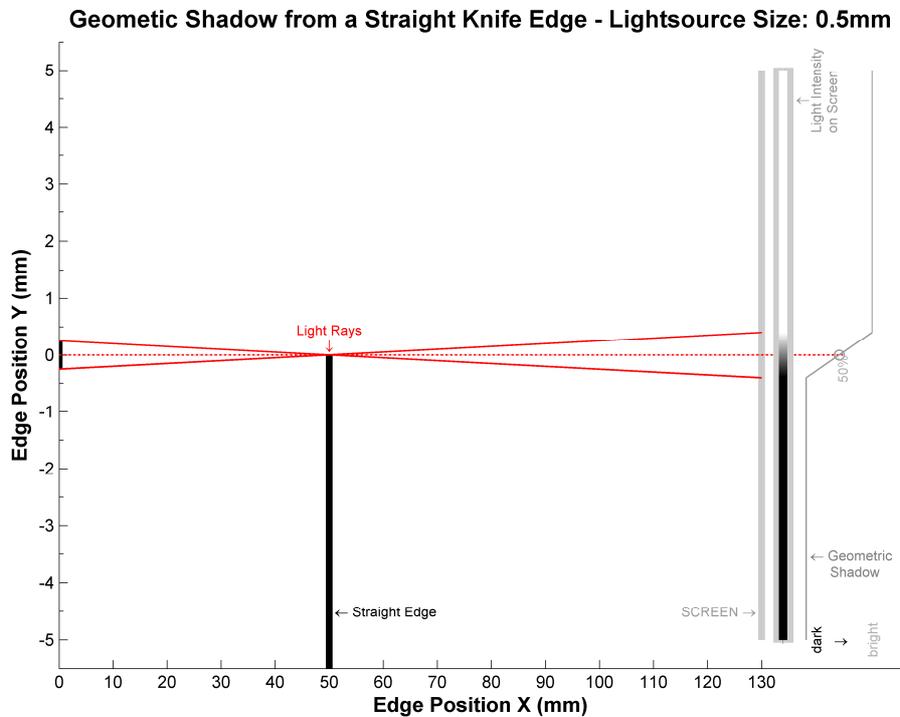


Abb. 33 - Geometrische Abbildung einer Kante bei Belichtung mit einer nicht punktförmigen Lichtquelle, 50mm Kantenabstand

Dabei zeigt sich der erwartete Helligkeitsverlauf am Sensor, wie man ihn bei Verwendung einer LED als Lichtquelle beispielsweise erwarten würde. Dabei erkennt man sehr gut, dass bei Vernachlässigung aller Nebeneffekte eine Schwellwertdetektion bei 50% der maximalen Intensität I_0 die exakte Y Position der Kante liefern würde. Verändert man die Kantenposition oder die Größe der Lichtquelle, so ändert sich lediglich nur die „Breite“ der Schattenprojektion, die Y Position der Kante bleibt jedoch immer bei 50% von I_0 .

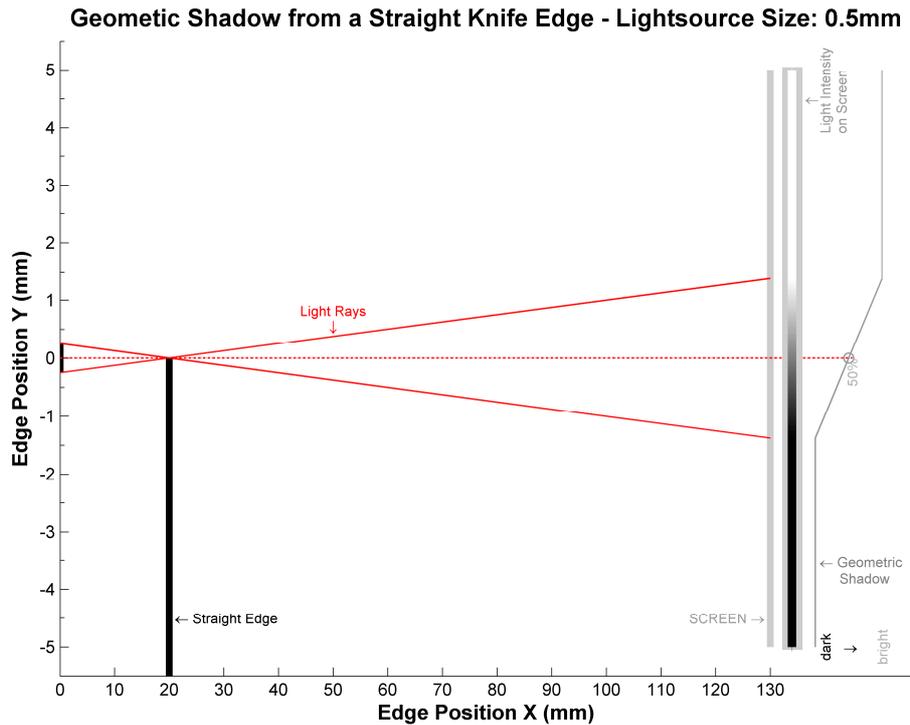


Abb. 34 - Geometrische Abbildung einer Kante bei Belichtung mit einer nicht punktförmigen Lichtquelle, 20mm Kantenabstand

Durch dieses Wissen könnte man also bei Verwendung von zwei oder mehr Lichtquellen, welche sich natürlich an anderer Y Position befinden müssen, die X/Y Position der Kante im Messfeld durch einfache geometrische Zusammenhänge exakt bestimmen (siehe 2.2.3. Positionsbestimmung im X/Y Messfeld).

In der Praxis erweist sich dieser Ansatz der einfachen Schwellwertdetektion leider als unzureichend, da die auftretenden Nebeneffekte eine genaue Positionsbestimmung unmöglich machen. Daher muss ein Weg gefunden werden, wie aus den realen Daten durch Kenntnis des einfachen geometrischen Modells die Position der Kante bestimmt werden kann. Dies wird im 4. Kapitel detailliert besprochen.

Als geeignete Lichtquellen bieten sich, wie schon zu Beginn der Arbeit erwähnt, nicht nur LED's, sondern auch Laserdioden an. Diese besitzen meist höhere Lichtleistungen, welche für kurze Belichtungszeiten notwendig sind. Dabei muss jedoch beachtet werden, dass bei Laserlicht die auftretenden physikalischen Effekte nicht mehr vernachlässigt werden können.

2.2.2. Beugung von Licht an einer Kante

Schon sehr früh im 16. Jahrhundert wurde erkannt, dass bei parallel eintreffenden Lichtstrahlen ein Teil des Lichts in den geometrischen Schatten des Objektes eintritt und der Schattenwurf dadurch etwas unscharf wirkt. Die Erklärung liegt in allgemein bekannten Beugungseffekten, die an Kanten auftreten.

Beugungseffekte lassen sich ganz generell ähnlich wie Interferenzerscheinungen erklären. Wenn sich zwei Lichtwellen mit konstanter Phase in einem Punkt eines Mediums treffen, so wird festgestellt, dass sich die Intensität des Lichts in diesem Punkt von der Intensität der einzelnen Lichtwellen

unterscheidet. Genau diesen Intensitätsunterschied, welcher durch Superposition mehrerer Lichtwellen in einem Punkt entsteht, nennen wir Interferenz. Je nach Phasenlage unterscheidet man zwischen Regionen mit konstruktiver und destruktiver Interferenz. Bei sehr genauen Weglängenmessungen mit Interferometern wird genau dieser Umstand ausgenutzt. Dabei erkennt man, dass die Modellierung von Lichtausbreitung durch Wellen wesentlich mächtiger als der geometrische Ansatz ist und nachfolgend daher noch genauer analysiert wird.

Um die entstehenden Beugungsmuster berechnen zu können wird daher angenommen, dass Licht vollständig als Elektromagnetische Welle beschrieben werden kann. Als hilfreicher Denkansatz kann zunächst das Huygens-Fresnel Prinzip angewendet werden.

Huygens' Prinzip beschreibt, dass an jedem Punkt einer, sich von einer punktförmigen Lichtquelle ausgesendeten sphärischen Wellenfront wieder punktförmige Lichtquellen platziert werden können, deren ausgesendete Wellenfronten sich zu einem beliebigen späteren Zeitpunkt wieder zu einer sphärischen Wellenfront addieren lassen.

Befindet man sich in einem sehr großen Abstand zu der emittierenden Lichtquelle, so ist die eintreffende Wellenfront planar. Auch dabei ist es möglich die Wellenfronten zu einem späteren Zeitpunkt mit Hilfe von Huygens' Prinzip zu modellieren. Abb. 35 veranschaulicht diesen Zusammenhang.

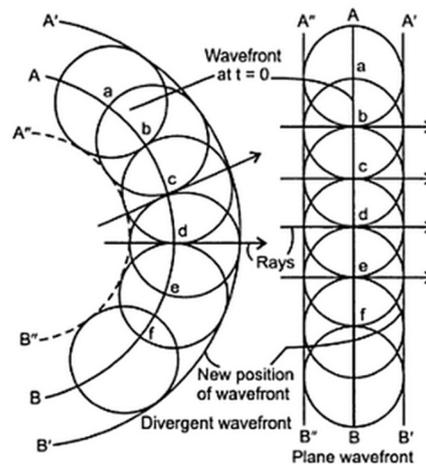


Abb. 35 - Huygens' Prinzip der Wellenausbreitung [6]

Dieses Prinzip sowie die zuvor angestellten Überlegungen stellen die Grundlage für das bekannte Doppelspaltexperiment (Abb. 36) dar. Thomas Young hatte dieses schon 1801 zum Nachweis der Wellencharakteristik von Licht durchgeführt.

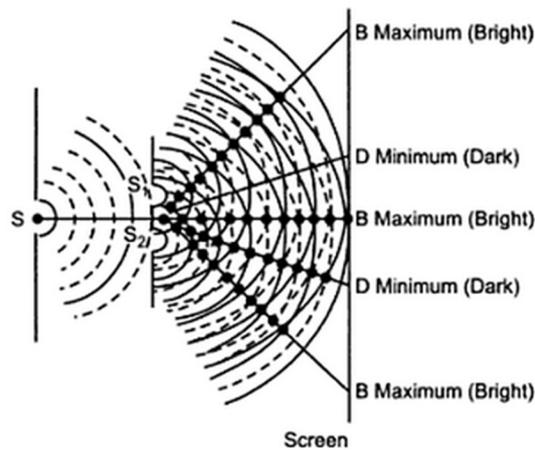


Abb. 36 - Doppelspalt Experiment [6]

Von der monochromatischen Lichtquelle, das heißt, es wird nur Licht einer Wellenlänge emittiert, werden im Punkt S sphärische Wellenfronten ausgesendet. Nach Huygens' Prinzip wird jeder Punkt einer Wellenfront eine weitere Lichtquelle, die für sich selbst wieder sphärisch ausbreitende Wellen emittiert. Dadurch können in den beiden existierenden Schlitzen oder Löchern, S1 und S2 wiederum sekundäre Lichtquellen angenommen werden. Durch die Phasenlage der einzelnen Wellenfronten, kann daher das in der Abbildungsebene entstehende Muster berechnet werden. Sind S1 und S2 Löcher, so ergeben sich als Lösung die sogenannten Interferenzringe, wie sie aus zahlreichen Experimenten in der Physik bekannt sind.

Für eine vereinfachte Betrachtung kann angenommen werden, dass sich die Lichtquelle unendlich weit entfernt von Objekt und Sensorebene befindet, damit die auf die Apertur einfallenden Wellenfronten als planar angenommen werden können.

Betrachten wir zunächst die Intensität in einem beliebigen Punkt P_0 . Stellt man sich nun vor, dass an jedem Punkt einer beliebigen Aperturöffnung Lichtquellen platziert werden, so kann der Beitrag dieser sekundären Quellen zur Intensität im Punkt P_1 durch Integration über die Aperturöffnung Σ berechnet werden.

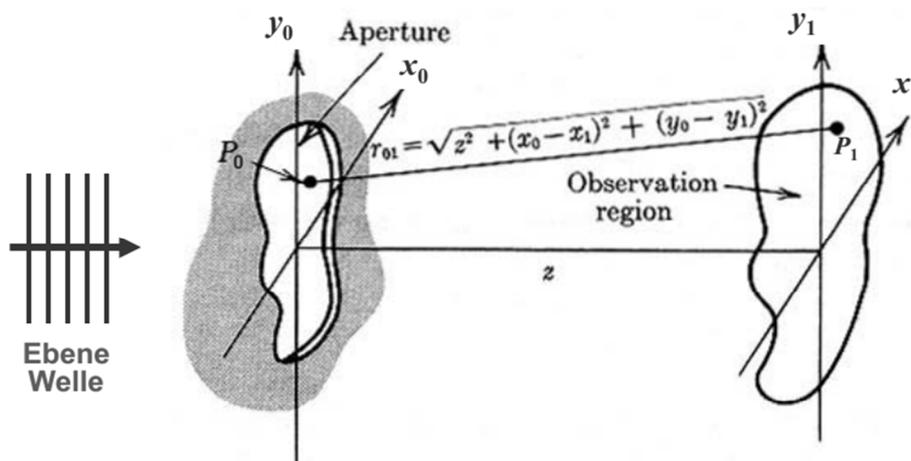


Abb. 37 - Intensität nach einer beliebigen Apertur [13]

Nachfolgend sind einige Formeln als Zusammenfassung aus¹¹ angeführt, welche die Entstehung der Fresnelschen Beugungsintegrale recht gut beschreiben.

Das elektrische Feld $E(x_1, y_1)$ in der Distanz z hinter der Apertur Öffnung berechnet sich folgend:

$$E(x_1, y_1) = \iint_{\Sigma} h(x_1 - x_0, y_1 - y_0, z) E(x_0, y_0) dx_0 dy_0$$

mit:

$$\Sigma = A(x_0, y_0),$$

$$h(x_1 - x_0, y_1 - y_0, z) = \frac{1}{i\lambda} \frac{\exp(ikr_{01})}{r_{01}}, \quad r_{01} = \sqrt{z^2 + (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2}$$

Dabei beschreibt h die auslaufende Kugelwelle und r_{01} den Abstand des Quellpunktes P_0 in der Apertur zum Schirmpunkt P_1 . Die Intensität des elektrischen Feldes fällt quadratisch mit dem Abstand (Energieerhaltung), sowie quadratisch mit der Wellenlänge (größere Beugung). Für den Zähler von h ist es zulässig im Nahfeld die Näherung $r_{01} \approx z$ zu verwenden. Für r_{01} ergibt sich nach einer Reihenentwicklung:

$$\begin{aligned} r_{01} &= z \sqrt{1 + \left(\frac{x_0 - x_1}{z}\right)^2 + \left(\frac{y_0 - y_1}{z}\right)^2} \approx z \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{x_0 - x_1}{z}\right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{y_0 - y_1}{z}\right)^2 \right] \\ &= z + \frac{(x_0 - x_1)^2}{2z} + \frac{(y_0 - y_1)^2}{2z} \end{aligned}$$

Einsetzen der Näherungen ergibt:

$$E(x_1, y_1) = \iint_{A(x_0, y_0)} \frac{1}{i\lambda z} \exp\left(ik \left[z + \frac{(x_0 - x_1)^2}{2z} + \frac{(y_0 - y_1)^2}{2z} \right]\right) E(x_0, y_0) dx_0 dy_0$$

Durch Ausmultiplizieren im Exponenten sowie herausziehen konstanter Terme erhält man:

$$\begin{aligned} E(x_1, y_1) &= \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \exp\left(ik \frac{x_1^2 + y_1^2}{2z}\right) \cdot \\ &\iint_{A(x_0, y_0)} \exp\left(ik \left[\frac{-2x_0x_1 - 2y_0y_1}{2z} + \frac{x_0^2 + y_0^2}{2z} \right]\right) E(x_0, y_0) dx_0 dy_0 \\ E(x_1, y_1) &\propto \iint_{-\infty}^{\infty} \exp\left(ik \left[\frac{-2x_0x_1 - 2y_0y_1}{2z} + \frac{x_0^2 + y_0^2}{2z} \right]\right) A(x_0, y_0) dx_0 dy_0 \end{aligned}$$

Daraus lässt sich erkennen, dass in jedem Punkt der x, y Ebene die Intensität berechnet werden kann. Da uns in unserem Fall bei einer Abschattung durch eine Kante jedoch nur die Auswertung entlang

¹¹ Auszüge aus [11]

einer Achse interessiert, können die Integrale stark vereinfacht werden, sodass die bekannten Fresnel Integrale, welche den Intensitätsverlauf entlang einer Linie am Projektionsschirm beschreiben, entstehen¹²:

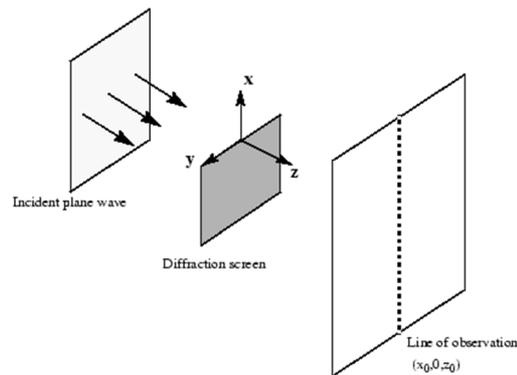


Abb. 38 - Beugung von Licht an einer Kante entlang einer Beobachtungslinie

$$I = \frac{I_0}{2} \left[\left(C(\zeta) + \frac{1}{2} \right)^2 + \left(S(\zeta) + \frac{1}{2} \right)^2 \right]$$

$$C(\zeta) = \int_0^\zeta \cos\left(\frac{\pi}{2} t^2\right) dt$$

$$S(\zeta) = \int_0^\zeta \sin\left(\frac{\pi}{2} t^2\right) dt$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{k}{2z_0}} \cdot x, k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Da es für diese Integrale keine analytische Lösung gibt, können diese nur numerisch gelöst werden. Dazu existiert für diese beiden Integrale eine MatLab-Implementierung, welche das Auswerten dieser stark erleichtert. Zur Veranschaulichung ist in Abb. 39 ein Beispiel angeführt, welches in MatLab implementiert und zur weiteren Simulation von Beugungen an den Kanten benutzt wurde. Dabei wurde als Kantenabstand zum Schirm (z_0) 130mm gewählt, sowie eine Wellenlänge (λ) von 650nm verwendet. Zum Vergleich wurde auch der geometrische Schatten eingefügt.

¹² Auszug aus der MatLab 2012a Hilfe (Bild und nachfolgende Formeln)

Fresnel Diffraction Pattern from a Straight Knife Edge and a Point Light Source

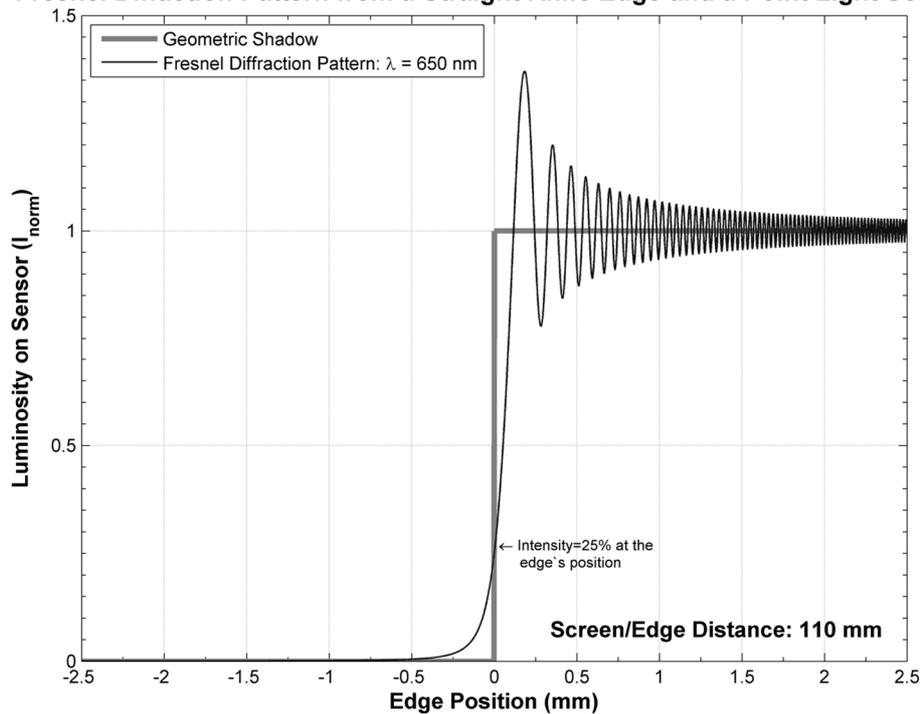


Abb. 39 - Beugungsmuster einer Kante

Eine genauere Betrachtung dieser Lösung ergibt, dass der Schattenwurf im Punkt $x(0)$, $y(0)$, also genau an der Kantenposition, eine Intensität von $1/4 \cdot I_0$ erreicht. Dies wird auch ersichtlich, wenn man die Integrale für diesen Punkt auswertet. Daher ist die Intensität der Projektion der Objektkante, bei Verwendung einer punktförmigen monochromatischen Lichtquelle, im Punkt $x(0)$, $y(0)$ unabhängig von Wellenlänge λ und Abstand z_0 , immer gleich 25% der Lichtintensität I_0 .

2.2.3. Positionsbestimmung im X/Y Messfeld

Durch die Verwendung von mehr als 2 Lichtquellen kann der aktive Messbereich durch die Überlappung der Lichtkegel der einzelnen Lichtquellen vergrößert und gleichzeitig, durch Mehrfachbelichtungen im Zentrum des Messfeldes, die Genauigkeit verbessert werden. Die nachfolgende Abb. 40 veranschaulicht für einen beispielhaften Messaufbau diesen Sachverhalt. Details dazu werden in Kapitel 4 noch genauer besprochen.

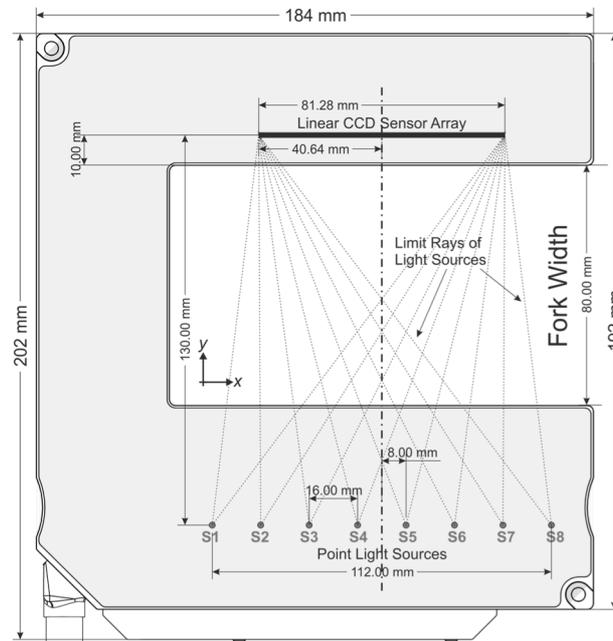


Abb. 40 - Aktiver Messbereich

Das Prinzip der Berechnung einer Kantenposition im X/Y Messfeld ist recht einfach. Durch Belichtung mit zwei Lichtquellen ergeben sich zwar in Bezug auf die Form der Kante dieselben Kantenprojektionen am Sensor, jedoch an unterschiedlichen Positionen. Kann man die Kante in den beiden Belichtungen detektieren, so ergibt sich durch einfache geometrische Zusammenhänge die X/Y Position der Kante im Schnittpunkt der Kantenprojektionen.

Zur besseren Veranschaulichung wurden im folgenden Beispiel punktförmige Lichtquellen und ein geometrisches Modell des optischen Pfades gewählt, da dabei die projizierte Kantenposition am Sensor besonders gut erkennbar wird. Grundsätzlich kann man diese Idee jedoch auch leicht mit einem beliebig komplexen Modell des optischen Pfades anwenden, sodass hier auch die in Realität auftretenden Beugungserscheinungen berücksichtigt werden können. In Abb. 41 ist dies mit einer recht einfachen geometrischen Kantenprojektion durch Verwendung von punktförmigen Lichtquellen illustriert.

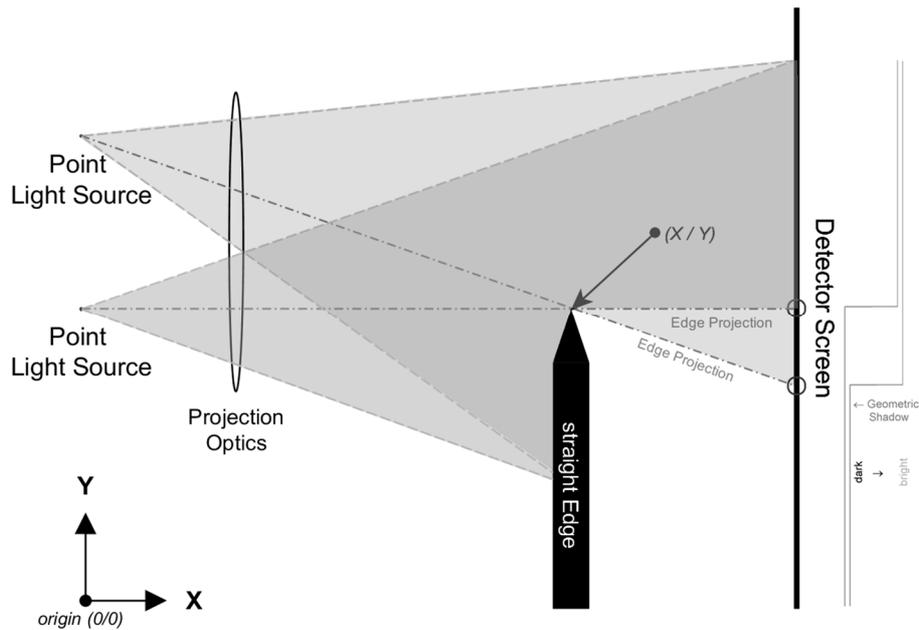


Abb. 41 - Messbereich bei Verwendung mehrerer Lichtquellen

Voraussetzung für diese sehr einfache Berechnung sind aber folgende Randbedingungen:

- Lichtquellen sind punktförmig
- X/Y Positionen der Lichtquellen sind bekannt
- Lage des Sensors ist parallel zur Y Achse
- Kante ist sehr dünn
- Es existiert ein einziger Schnittpunkt der Kantenprojektionen

Werden mehrere Lichtquellen verwendet, so ergibt sich ein weiteres Optimierungsproblem, da mehrere Belichtungen einer einzigen Kante durch Messunsicherheiten zu mehreren Schnittpunkten respektive weiteren X/Y Positionen führen. Einfache und leicht zu implementierende Algorithmen wie z.B.: Methode der kleinsten Fehlerquadrate können dabei aber Abhilfe schaffen.

2.3. Signal-Verarbeitung und Konditionierung

Um die Positionsinformation von Kanten, welche in der Bildebene aufgrund teilweiser Verschattung durch ein lichtundurchlässiges Objekt entsteht, nun weiter bearbeiten zu können, ist es notwendig, die Intensität des einfallenden Lichts zuerst mit geeigneten Sensoren zu erfassen und die dadurch erhaltene Information geeignet weiterzuverarbeiten.

Daraus lässt sich erkennen, dass die Verarbeitungskette aus folgenden Teilen besteht:

- Analoge Signalverarbeitung (Lichtintensität erfassen und elektrische Signale umwandeln)
- Analoge Signalkonditionierung (analoge elektrische Signale aufbereiten)
- Digitalisierung (Wertdiskretisierung der elektrischen Signale)
- Digitale Signalverarbeitung (Positionsbestimmung der Kante am Mikrocontrollersystem)

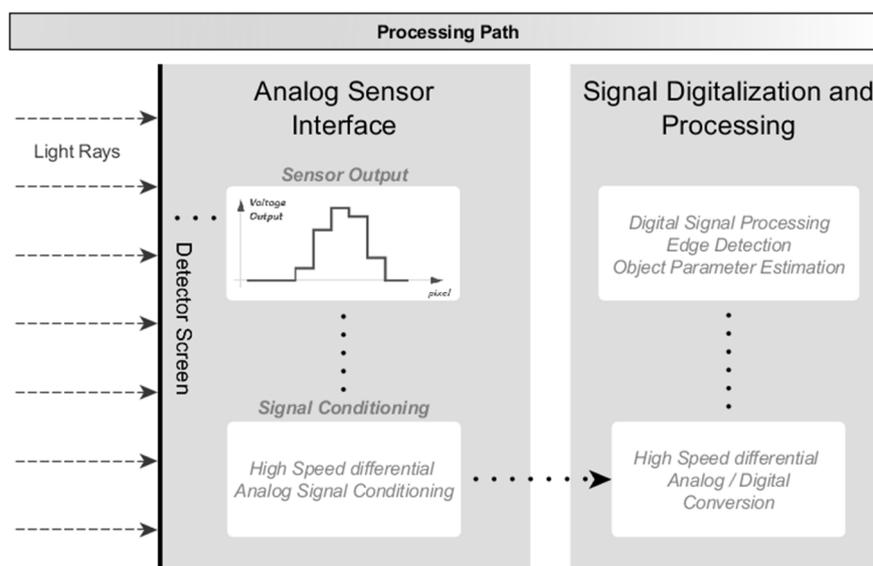


Abb. 42 - Signal-Konditionierung und Verarbeitung

Abb. 42 zeigt die Verarbeitungskette vom einfallenden Licht bis zur Verarbeitung im Mikrocontroller System. Ein wertkontinuierliches elektrisches Signal, welches den Helligkeitswert eines jeden Pixels repräsentiert, wird von dem Sensor Pixel für Pixel ausgegeben. Dieses analoge Signal wird durch die nachfolgende Elektronik aufbereitet und mit einem Analog-Digital-Umsetzer wertdiskretisiert. Die eigentliche Positionsbestimmung eines Objektes erfolgt durch nachfolgende, mehrstufige digitale Signalverarbeitung. In den nachfolgenden Unterkapiteln werden diese einzelnen Verarbeitungsschritte etwas detaillierter betrachtet.

2.3.1. Analoge Signalverarbeitung

Um die Intensität von Licht an bestimmten Positionen aufnehmen zu können, werden wie schon festgestellt optische Sensoren, auch Bildsensoren genannt, benötigt.

Auch ein solcher Sensor kann in mehrere Funktionsblöcke eingeteilt werden.

- der eigentliche Sensor-Teil, welcher eintreffendes Licht in Ladungspakete wandelt und diese speichert,
- einen Scan-Teil welcher jedem Ladungspaket eine Pixeladresse zuordnet,
- und einen Interface-Teil, welcher die gespeicherte Ladungsmenge in ein elektrisches Signal konvertiert.

Repräsentativ seien an dieser Stelle 2 Sensortypen auf Siliziumbasis genannt:

- Charge-coupled Device (CCD)
- Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS)

CCD Sensoren besitzen eine lineare und CMOS Sensoren hingegen eine logarithmische Empfindlichkeit. Die Art und Weise, wie man Bildinformationen vom Sensor erhält, unterscheidet diese beiden Typen gravierend.

2.3.1.1. CCD Sensoren

Grundsätzlich gibt es CCD Sensoren mit lichtempfindlichen Sensorelementen in Zeilen oder Matrix Anordnung, welche je nach Art des verwendeten Halbleitersmaterials und dessen Dotierung einen bestimmten Bereich des Lichts besser absorbieren und dadurch Ladungen generieren, welche proportional zur Intensität des einfallenden Lichtes ist. Als Beispiel für eine recht bekannte Anwendung von großen CCD Arrays sei an dieser Stelle Nikon als ein namhafter Hersteller von Digitalkameras genannt, welcher diese Sensortechnologie aktuell bei einigen Kameras einsetzt.

CCD Sensoren sind deutlich empfindlicher als CMOS Sensoren und auch weitestgehend unempfindlich gegenüber magnetischen Einwirkungen von außen. Je höher die Pixeldichte, desto kleiner werden die einzelnen Sensorelemente. Daher ist die Empfindlichkeit des Sensors direkt mit der Ortsauflösung gekoppelt und stellt immer einen Kompromiss dar. Durch die Verwendung von Mikrolinsen (Abb. 43) oder spiegelnden Keilen (μ -WOC, Micro-Wedge Optical Concentrators), kann mehr Licht auf ein Sensorelement konzentriert werden und dadurch die Empfindlichkeit wieder erhöht werden.

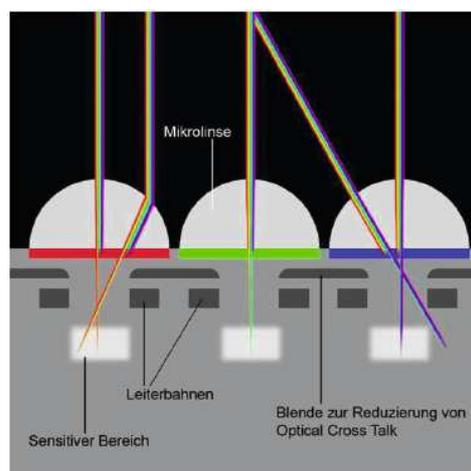


Abb. 43 - Pixelarray mit Mikrolinsen [2]

Die Funktionsweise eines CCD Sensors lässt sich grundsätzlich in 2 Verarbeitungsschritte einteilen¹³:

I. Belichtungsphase (Integrationszeit)

- Einfall von Photonen auf die lichtempfindlichen Pixelflächen
- Absorption der Photonen und Erzeugung von Ladungsträgern
- Freie Ladungen werden in den Pixeln gesammelt (integriert)
- Die erzeugten Ladungen sind proportional zur einfallenden Lichtmenge

II. Ladungstransport (Auslesephase)

- Ladungen einzelner Pixel werden je nach Sensortyp zuerst in ein Schieberegister zum Zwischenspeichern übernommen
- Sequentieller Ladungstransport über Transfer Gates zum Ausleseverstärker
- Umwandeln der einzelnen Ladungspakete in eine Spannung
- Die Photokapazitäten sind nun gelöscht, der Auslesevorgang kann erneut gestartet werden

Da alle Ladungspakete denselben Ausleseverstärker durchlaufen ergibt sich eine konstante Verstärkung als weiterer Vorteil. Das Auslesen der einzelnen Pixel erfolgt durch externes Takten des internen Schieberegisters. Je nach Anwendungsgebiet unterscheidet man zwischen Flächen- und reinen Zeilensensoren. Beide Varianten werden auf den nachfolgenden Seiten etwas genauer vorgestellt.

Für Flächensensoren gibt es grundsätzlich 4 verschiedene Varianten, wie die Ladungen der einzelnen Pixel intern zum Ausleseverstärker verschoben werden:

Interline-Transfer CCD

Beim Interline-Transfer sind die lichtempfindlichen Pixel in Streifenform angeordnet, deren gespeicherte Ladungen beim Auslesen in den jeweils danebenliegenden Bereich von abgedunkelten Schieberegistern, auch Transfer Gates genannt, gespeichert wird. Von dort werden diese dann zuerst immer zeilenweise in das horizontale Schieberegister und von diesem seriell in den Ausleseverstärker transferiert (siehe Abb. 44).

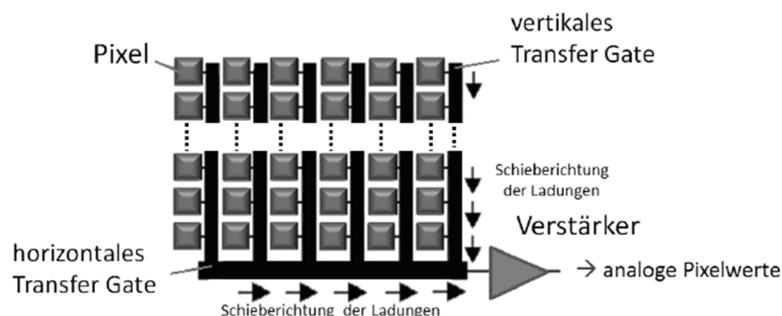


Abb. 44 - Prinzip des Interline Transfers [2]

¹³ Zusammenfassung von Kapitel 12 aus [2]

Vorteile:

Synchroner und asynchroner elektronischer Verschluss realisierbar, geeignet für Bewegte Bild Aufnahmen

Nachteile:

Geringere Größe der lichtempfindlichen Sensorfläche bedingt durch die vertikalen Transfer-Gates

Frame Transfer CCD

Im Gegensatz zu Interline Transfer CCD's sind hier die Transfer-Gates nicht streifenförmig angeordnet, sondern der gesamte Sensor in zwei Bereiche getrennt. Dabei werden zuerst die Ladungen aus dem gesamten CCD Array in den abgedunkelten Bereich geschoben um dann wieder seriell, Zeile für Zeile, durch den Ausleseverstärker in eine analoge Ausgangsspannung umgewandelt zu werden

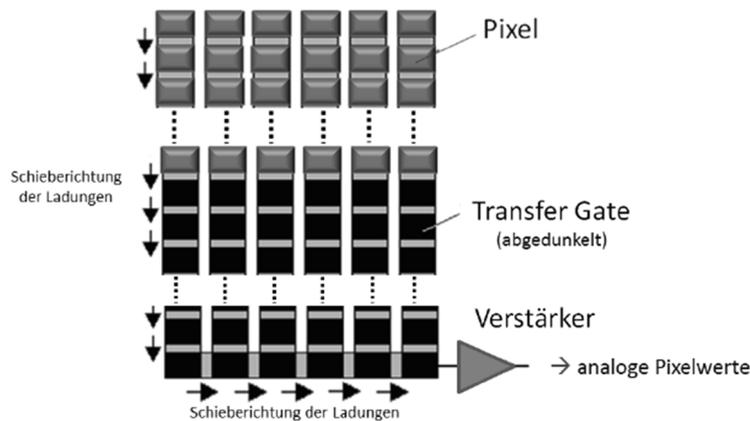


Abb. 45 - Prinzip des Frame Transfer CCD's [2]

Vorteile:

Nahezu die gesamte Sensorfläche kann mit lichtempfindlichen Pixeln gefüllt werden. Daraus ergibt sich ein hoher Dynamikumfang und eine hohe Empfindlichkeit. Wird ein mechanischer Verschluss benutzt können zwei Bilder in sehr kurzer Zeit nacheinander aufgenommen werden.

Nachteile:

Während dem Ladungstransport fällt weiter Licht auf den lichtempfindlichen Bereich des Sensors, daher kommt es zu „smear“, sogenannten Verschmierungseffekten, welche nur durch lange Integrationszeiten und sehr kurze Auslesezeiten verhindert werden können. Ein mechanischer Verschluss schafft Abhilfe gegen dieses Problem. Aufgrund der großen Sensorfläche sind Frame Transfer CCD's teurer als Interline Transfer CCD's.

Full Frame CCD

Ein Full Frame CCD funktioniert im Prinzip ähnlich wie ein Frame Transfer CCD jedoch mit dem Unterschied, dass es nicht den gesamten Sensorinhalt zwischenspeichert, sondern nur eine Zeile mit Transfertgates besitzt.

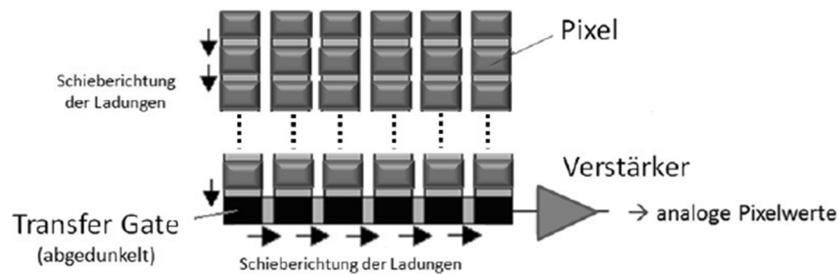


Abb. 46 - Prinzip des Full Frame CCD [2]

Vorteile:

Nahezu die gesamte Sensorfläche kann mit lichtempfindlichen Pixeln gefüllt werden. Daraus ergibt sich wie bei Frame Transfer CCD's ein hoher Dynamikumfang und eine hohe Empfindlichkeit.

Nachteile:

Während der gesamten Auslesephase fällt weiter Licht auf den lichtempfindlichen Bereich des Sensors, daher kommt es zu starkem „smear“, welche nur durch einen mechanischen Verschluss verhindert werden kann. Mechanische Verschlüsse sind langsam und daher wird dadurch die Bildauslesegeschwindigkeit begrenzt.

Frame Interline Transfer CCD

Diese stellen eine Kombination aus Frame Transfer und Interline Transfer Sensoren dar. Dadurch wird die höchste Bildauslesegeschwindigkeit aller verglichenen CCD Auslesemethoden erreicht.

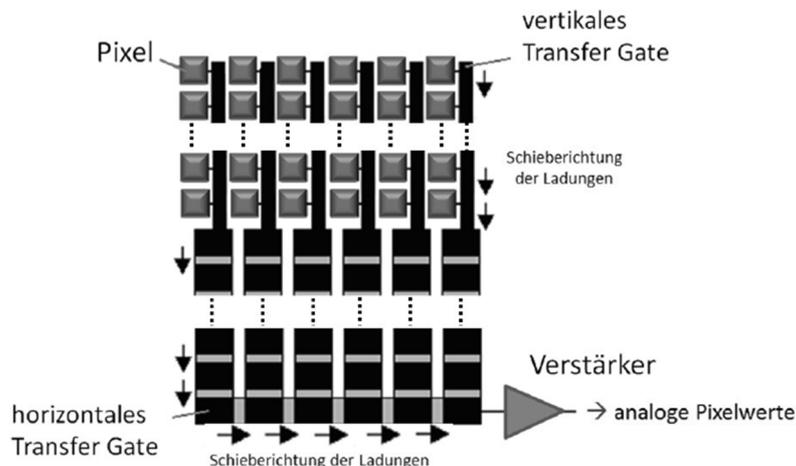


Abb. 47 - Prinzip der Frame Interline Transfer CCDs [2]

Vorteile:

Es ist kein mechanischer Verschluss notwendig, daher wird sehr schnelles Auslesen möglich.

Nachteile:

Aufwendige Fertigung und große Sensorfläche lassen diesen Sensor verhältnismäßig teuer werden.

Diese Betrachtungen führen uns zu CCD Zeilensensoren, da es für bestimmte Anwendungen ausreichend sein kann, eine Belichtung nur einer Sensorzeile aufzunehmen.

CCD Sensoren mit einer einzigen Zeile

Als Einsatzgebiet für einzeilige CCD Sensoren seien beispielsweise Barcodescanner oder Kopierer genannt. Diese CCD Sensoren existieren in Farb-, mit jeweils rotem, grünem und blauem Farbfilter, oder auch in Monochromausführung. Die Form der Pixel sowie deren Anzahl ist stark von der Anwendung abhängig.

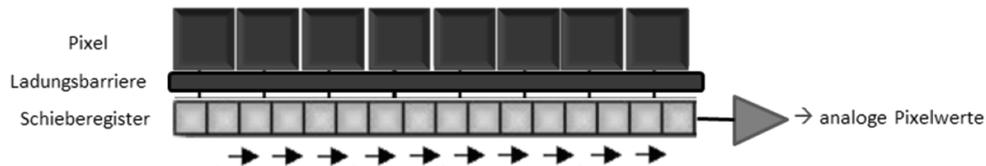


Abb. 48 - Prinzip eines CCD Zeilensensors [2]

Vorteile:

Dieser Sensortyp ermöglicht hohe räumliche Auflösungen sowie hohe Auslesegeschwindigkeiten und erzeugt kein Smear.

Nachteile:

Es werden für sehr kurze Belichtungszeiten hohe Beleuchtungsintensitäten benötigt.

2.3.1.2. CMOS Sensoren

CMOS Sensoren besitzen gegenüber CCDs den Vorteil, dass jeder Pixel einzeln adressierbar ist. Die erzielbaren Auslesegeschwindigkeiten können deutlich größer als bei CCDs sein. Auch bei CMOS Sensoren unterscheidet man zwischen PPS (passive Pixel Sensor) und APS (active Pixel Sensor) Technologien.

PPS (passive Pixel Sensor)

In dieser älteren Variante der CMOS Sensoren besteht jeder Pixel aus einer Photodiode und einem MOS Transistor als Schalter zur Auswahl des Pixels. Wird der Transistor durch Ansteuerung leitend, so fließen die gespeicherten Ladungen über diesen in die Spaltenleitung und werden nachfolgend wie bei CCD Sensoren über einen Ausleseverstärker in eine Spannung umgewandelt.

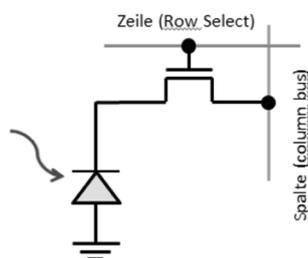


Abb. 49 - Prinzip einer Passive Pixel Cell [2]

Dieser Typ von CMOS Sensoren zeichnet sich durch die geringe Anzahl an benötigten Bauelementen und die dadurch erreichbare sehr hohe Pixeldichte aus.

APS (active Pixel Sensor)

Im Gegensatz zu PPS Architekturen findet bei Active Pixel Sensoren die Umwandlung in eine Spannung direkt am Pixel durch einen eigenen Ausleseverstärker für jedes einzelne Pixel statt. Dadurch wird der Signal Rauschabstand signifikant erhöht, jedoch steigt auch die Anzahl der benötigten Halbleiter-Bauelemente. Dies resultiert unweigerlich in einer Reduzierung der Pixeldichte, bzw. der aktiven lichtempfindlichen Sensorfläche. Durch die Verwendung von Mikrolinsen können aber diese nachteiligen Effekte schon sehr gut kompensiert werden.

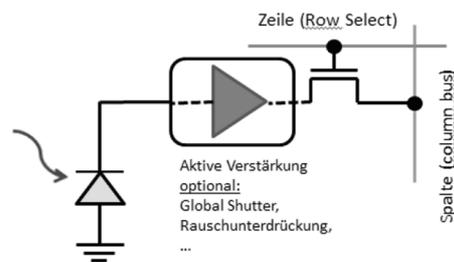


Abb. 50 - Prinzip einer Active Pixel Cell [2]

2.3.1.3. Vergleich von CCD und CMOS Sensoren

Durch den grundsätzlich verschiedenen Aufbau der beiden Sensortypen lassen sich folgende Vor- und Nachteile von CMOS gegen CCD Sensoren herausarbeiten¹⁴:

Vorteile von CMOS Sensoren gegenüber CCD:

- Geringere Baugröße der Kamera, da die Auswertelogik auf dem Sensor-Chip integriert werden kann
- Niedrigere Herstellungskosten, da die Fertigung weitestgehend der Speicher-/Prozessor-Fertigungstechnologie entspricht und damit eine Standardtechnologie darstellt
- Geringere Leistungsaufnahme im Verhältnis zu CCD
- Hohe Bildwiederholraten auch bei höheren Auflösungen
- Schnelleres und flexibles Auslesen durch direkte Adressierung der einzelnen Pixel anstelle des bei CCD über Schieberegister spalten- und zeilenweisen Ladungstransports ermöglicht mehr Möglichkeiten für Binning & Partial Scan (Region of Interest)
- Im Vergleich zu CCD kein Blooming und Smear
- Hohe Dynamik (> 60 dB), logarithmische Kennlinie durch welche es möglich ist, beispielsweise einen Dynamikbereich von über 120 dB zu erschließen. Das Erfassen sehr kontrastreicher und extrem heller Objekte (z. B. bei der Aufnahme von Schweißprozessen) ist damit ohne Überbelichtung des Bildes möglich.

¹⁴ Auszug von Kapitel 12 aus [2]

Nachteile von CMOS Sensoren gegenüber CCD:

- Die Empfindlichkeitsunterschiede zwischen den Pixeln aufgrund von Fertigungstoleranzen führt zu Fixed-Pattern-Noise bei Monochromkameras und zu erhöhtem Farbrauschen bei Color-Kameras.
- Typischerweise hohes Ausleserauschen (Dunkelstrom)
- Geringerer Fill-Factor (Verhältnis der photoempfindlichen Fläche zur gesamten Pixelfläche), bewirkt eine schlechtere Lichtempfindlichkeit. Zur Kompensation, werden wie bei CCD zunehmend Mikrolinsen eingesetzt, die sich direkt auf dem Chip befinden und das Licht weitestgehend auf den photoempfindlichen Teil des Pixels bündeln.
- Statt der CCD-Artefakte Blooming und Smear kann der Black-Sun-Effect¹⁵ in überbelichteten Bildteilen sichtbar sein.

Da die Auswahl eines geeigneten Sensors aufgrund der genannten Vor- und auch Nachteile gut überlegt sein sollte und auch nicht zuletzt in Bezug auf Preis und Verfügbarkeit an die aktuellen Projektanforderungen angepasst werden muss, wurden als geeignete Zeilensensoren ausschließlich CCD Sensoren schon vor Beginn dieser Arbeit identifiziert, hinsichtlich der genannten Gesichtspunkte evaluiert und in späterer Folge für das Projekt auch ausgewählt.

2.3.2. Analoge Signalkonditionierung

Wie beschrieben besitzen CCD Sensoren einen analogen Ausgang um die Belichtungswerte der einzelnen Sensorpixel repräsentieren zu können. Daher müssen, um eine Messung zu ermöglichen und wenn gleichzeitig hohe Auslesegeschwindigkeiten erzielt werden sollen, Vorkehrungen in der analogen Domäne getroffen werden, sodass hohe Geschwindigkeiten und große Dynamiken in Belichtungswerten überhaupt erst möglich werden. Nur mit entsprechender Signalkonditionierung, sprich Signalvorbereitung im analogen Verarbeitungspfad, kann dies erreicht werden. Einige Beispiele diese Signalkonditionierung betreffend möchte ich hier kurz anführen:

- Sensorsignalamplitude zu klein
 - Verstärkerschaltung (Signal höherer Leistung erzeugen)
 - Vergleichssignal erzeugen (Kompensationsmethode)
- Sensorsignalamplitude zu groß
 - Tastkopf (1:10, 1:100 etc.) oder passiven Spannungsteiler verwenden
- Belastung des Sensorausganges
 - zu hoch: Impedanzwandler
 - Leistungsanpassung
 - Impedanzanpassung
- Verarbeitung normierter Signalpegel
 - Industrieübliche Spannungs- und Stromschnittstellen (z.B.: 0-10V, 0/4-20mA)

¹⁵ Als Black Sun Effekt wird ein schwarzer Punkt oder eine schwarze Fläche innerhalb eines überbelichteten Bereichs bezeichnet

- Nichtideale Sensorkennlinie
 - Offsetkorrektur und/oder Linearisierung möglich
- Verrauschtes Signal
 - Filterung, Bandbegrenzung

Eine prinzipielle Betrachtung der gegebenen Randbedingungen soll kurz die notwendige Systemperformance aufzeigen. Angenommen die Sensorgröße beträgt 1280pixel (*TSL1410: 63,5µm Pixelabstand, Messbereich 81,28mm, 1280px*) welche seriell ausgelesen werden müssen. Eine Objekterkennung durch Belichtung mit 8 Lichtquellen soll sequentiell durchgeführt werden. Daraus ergibt sich bei einer Messgeschwindigkeit von 1kSamples (d.h.: 1000 Positionsmessungen pro Sekunde) folgende Pixel- Auslesegeschwindigkeit:

$$1kS * 8 \frac{\text{Belichtungen}}{s} = 8000 \frac{\text{Belichtungen}}{s}$$

$$\text{Pixeltakt} = 8000 \frac{\text{Bilder}}{s} * 1280px = 10,24MHz$$

Um solche Geschwindigkeiten erreichen zu können und dabei auch noch eine möglichst präzise Übereinstimmung von tatsächlicher Belichtungsstärke eines Sensorpixels und einem digitalen Messwert zu erhalten, ist es unerlässlich einige grundlegende Punkte beim Entwurf des Mixed-Signal-Gesamtsystems zu bedenken.

Amplitudenauflösung und Messbereich

Da zur Kantenerkennung mit Abbildungsmodellen Projektionsmuster errechnet werden, welche durch Kreuzkorrelation mit dem Sensorsignal die Kantenposition liefern, ist eine hohe Amplitudenauflösung des ADUs nicht unbedingt notwendig. Sein notwendiger Eingangsspannungsbereich wird durch die Ausgangsspannung des Sensors bestimmt. Diese kann aber durch aktive Verstärkerschaltungen oder rein passive schaltungstechnische Maßnahmen leicht in den Messbereich des ADUs verschoben werden. Da die konkrete Umsetzung einer solchen Maßnahme stark von dem verwendeten Sensor und ADU abhängt, wird dies in Abschnitt 3.2.3. detaillierter betrachtet.

Messgeschwindigkeit und Zeitverhalten

Wie bereits erwähnt ist für das Messsystem ein Pixeltakt von mindestens 10MHz zu erwarten. Wird die Ortsauflösung höher oder die Sensorzeile länger als jene im Rechenbeispiel, kann dieser durchaus noch schneller werden. Einige Zeilensensoren besitzen, um hohe Auslesegeschwindigkeiten zu ermöglichen, zwei oder mehr Analogausgänge, welche in einem Taktzyklus analoge Pixelwerte mehrerer Pixel parallel ausgeben. Mit entsprechenden Analog-Digital-Umsetzer ICs können diese auch direkt parallel weiterverarbeitet werden. Dadurch reduziert sich der benötigte Pixeltakt mit der Zahl der Analogausgänge am Sensor. Die Systemgeschwindigkeit bleibt durch den Pixeltakt weitestgehend unbeeinflusst und wird durch die geforderte Systemperformance von 1kS bei Verwendung von 8 Lichtquellen bestimmt. Daraus ergibt sich eine maximale Verarbeitungszeit von

$$\frac{1}{1000 \frac{\text{Samples}}{s}} * \frac{1}{8 \text{ Belichtungen}} = 125\mu s$$

für die gesamten 1280 Pixel unseres Beispiels inklusive Detektion der Kante. Unter der Annahme dass alle Pixel ausschließlich sequentiell verarbeitet werden, resultiert an einem Single ADU eine Verarbeitungszeit von in etwa 100ns für ein einzelnes Pixel. Dazu würde ein AD Umsetzer mit einer Sample-Geschwindigkeit $\geq 10\text{MSamples}$ benötigt werden. Wenn der Sensor eine Parallelverarbeitung mithilfe von mehreren Analogausgängen durch mehrere ADUs erlaubt, ist diese auf jeden Fall zu bevorzugen, da die Samplezeit pro Pixel und ADU Kanal länger wird und daher ein langsamerer ADU verwendet werden kann. Außerdem bieten längere Auslesezeiten für die erste Filterung des analogen Signals entscheidende Vorteile.

Störempfindlichkeit und Messunsicherheiten

Eine Filterung des analogen Sensorsignals mit einem Tiefpass würde schon vor der AD Wandlung ein dem Signal überlagertes Rauschen sowie eingekoppelte HF Störungen reduzieren. Wenn, wie schon erwähnt, durch Parallelverarbeitung der Pixel die Samplezeit pro Pixel verlängert werden kann, so sind auch die Zeitkonstanten verwendeter Tiefpässe dementsprechend größer zu wählen, sodass eine bestmögliche HF Störunterdrückung erzielt wird. Grundsätzlich ist eine große Störempfindlichkeit des analogen Pfades durch die Signalart sowie der Signalübertragung bis hin zur Digitalisierung gegeben.

Um hohe Signal-Rauschabstände zu erhalten werden oft große Signalpegel verwendet. In der für dieses Projekt verwendeten Konfiguration ist zumindest die Ausgangsspannung des Sensors durch den verwendeten Sensortyp vorgegeben und beschränkt sich auf maximal 5V. Dieser analoge Spannungswert, welcher die Helligkeitsinformation eines Pixels trägt, muss dann in geeigneter Weise zum ADU übertragen werden. Dies kann auf verschiedene Arten erfolgen:

- *Asymmetrische Signalübertragung (geerdet/nicht geerdet, geschirmt)*
 - Beispiel: Oszilloskop Tastkopf (geerdet und geschirmt)

- *Symmetrische Signalübertragung (geerdet/nicht geerdet, geschirmt)*
 - Beispiel: Studioteknik XLR Audioübertragung

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass aufgrund der Tatsache, dass es sich um ein Mixed Signal System handelt, die Leitungslängen für die Übertragung der Analogspannung zum ADU in jedem Fall so kurz als möglich gehalten werden sollen um Störbeeinflussungen durch digitale Schaltungsteile weitestgehend zu vermeiden. Symmetrische Leitungsausführungen besitzen diesbezüglich einige Vorteile die Störempfindlichkeit betreffend. Da das Sensorsignal bei den verwendeten Sensortypen aber ein asymmetrisches Ausgangssignal ist, müsste dieses zuerst symmetrisch aufbereitet werden. In Anbetracht der Tatsache, dass nahezu alle ADUs mit Samplegeschwindigkeiten von $>1\text{MS}$, differentielle d.h. symmetrische Eingänge besitzen, kann eine symmetrische Übertragung auch auf recht kurzen Wegen durchaus als sinnvoll erachtet werden.

Des Weiteren ergeben sich Messunsicherheiten nicht nur durch äußere Störbeeinflussungen, sondern auch durch Fehler, verursacht durch Quantisierung und nicht ideale Umsetzer-Kennlinien. Der Quantisierungsfehler liegt bei $\frac{1}{2}$ LSB des ADUs und wird durch dessen Auflösung bestimmt. Wird aufgrund der geforderten hohen Samplerate ein ADU mit einem differentiellen Eingang verwendet, so kann dieser, meist mit geringem Aufwand, auch immer nicht differentiell, sprich asymmetrisch betrieben werden. Dadurch wird die effektive Auflösung, ohne weitere schaltungstechnische Maßnahmen, jedoch um die Hälfte reduziert, der Quantisierungsfehler wirkt sich noch stärker aus und

der Signal-Rauschabstand wird kleiner. Eine symmetrische Aufbereitung des asymmetrischen Sensorsignals ist daher aus technischer Sicht empfehlenswert, da dadurch die Signaleigenschaften des digitalisierten Signals verbessert werden können.

Durch die Aufbereitung als symmetrisches Signal entsteht zusätzlicher schaltungstechnischer Aufwand, welcher gegenüber einer einfachen asymmetrischen Übertragung natürlich mit Kosten, sowie auch mit weiteren parasitären Effekten von nichtidealen und toleranzbehafteten Bauelementen verbunden ist. Daher ist eine Evaluierung dieser beiden Übertragungsarten in späterer Folge noch notwendig. Ob überhaupt, und in wie weit dies für das aktuelle System messbare Verbesserungen erzielt, kann aus momentaner Sicht nicht festgestellt und auch nicht im Rahmen dieser Arbeit betrachtet werden.

Anbindung an das Mikrocontrollersystem

Die Datenrate berechnet sich aus der Auflösung des ADUs und der Auslesegeschwindigkeit der Einzelbelichtungen. Diese beträgt daher, bei Verwendung eines 8bit AD Umsetzers 80Mbit/s, bei Verwendung von 12bit schon 120Mbit/s. Das gesamte digitale System ist aufgrund der großen Signal-Rauschabstände sehr störfest. Da sich der Aufbau des Gesamtsystems durch recht kurze Signalwege auszeichnet, da alle benötigten Komponenten relativ nahe, meist in wenigen Zentimetern Entfernung platziert sind und daher die digitalisierten Daten des ADUs zum Mikrocontroller nur sehr kurze Signalwege zurücklegen müssen, kann zur digitalen Übertragung, je nach Verfügbarkeit von Interfaces am Mikrocontroller und eingesetztem ADU, ein serielles, paralleles oder ein daraus kombinierbares Übertragungsverfahren für die digitalisierten Daten verwendet werden, ohne Einschränkungen in der maximal erzielbaren Datenrate befürchten zu müssen. Natürlich müssen einige grundlegende Designregeln im Layout beim Verbinden des ADUs mit dem Mikrocontroller beachtet werden, da es sich schon um große Datenraten handelt und der empfindliche Analogteil durch die digitale Datenübertragung nicht gestört werden darf.

Um solche Datenmengen überhaupt verarbeiten zu können ist es ratsam, den Datentransfer so weit als möglich in Hardware auszulagern und die Daten per DMA direkt in den Speicher des Mikrocontrollers zu verschieben, sodass dem Prozessor noch genügend Zeit zur Kantendetektion bleibt. Dies wird im nächsten Abschnitt 2.3.3. *Digitale Signalverarbeitung* detaillierter besprochen.

2.3.3. Digitale Signalverarbeitung

Nach der erfolgten Digitalisierung müssen die Daten am Mikrocontrollersystem entsprechend weiterverarbeitet werden um die gewünschten Kantenpositionen bestimmen zu können. Wie schon festgestellt wurde, ist die erzeugte Datenmenge von der Pixelanzahl abhängig. Daher müssen performante, auf das verwendete Mikrocontrollersystem abgestimmte Algorithmen entworfen werden. Moderne Mikrocontrollerarchitekturen besitzen je nach Einsatzgebiet Taktgeschwindigkeiten von weit über 100MHz und erzielen dabei je nach verwendeter Prozessorarchitektur mehrere hundert MIPS. Dass diese nach verschiedenen Kriterien ausgewählt und keineswegs die Prozessorgeschwindigkeit alleine betrachtet werden darf, wird auf den nachfolgenden Seiten anhand des Anwendungsszenarios erklärt.

Wie schon zuvor in Abschnitt 2.2. *Kantendetektion und Positionsbestimmung* festgestellt, ist die einfachste Art eine Kantenposition zu ermitteln einen Schwellwert festzulegen und diesen in dem auf den Sensor projizierten Schattenbild zu suchen. Geht man von einem stark vereinfachten Modell des optischen Pfades aus, so kann man für eine beliebig große Lichtquelle einen Schwellwert bei 50% der maximalen Beleuchtungsstärke als Kantenposition definieren. Mit der Größe der Lichtquelle ändert sich wie schon in den vorherigen Kapiteln festgestellt nur die „Breite“ des Schattens am Sensor, jedoch nicht die Position der Kante in den Daten, welche bei dieser Modellannahme immer bei 50% zu finden ist. Für das nachfolgende, sehr vereinfachte Beispiel, wurde angenommen, dass der Verlauf des geometrischen Schattens digitalen Werten zwischen 0 und 255 entspricht.

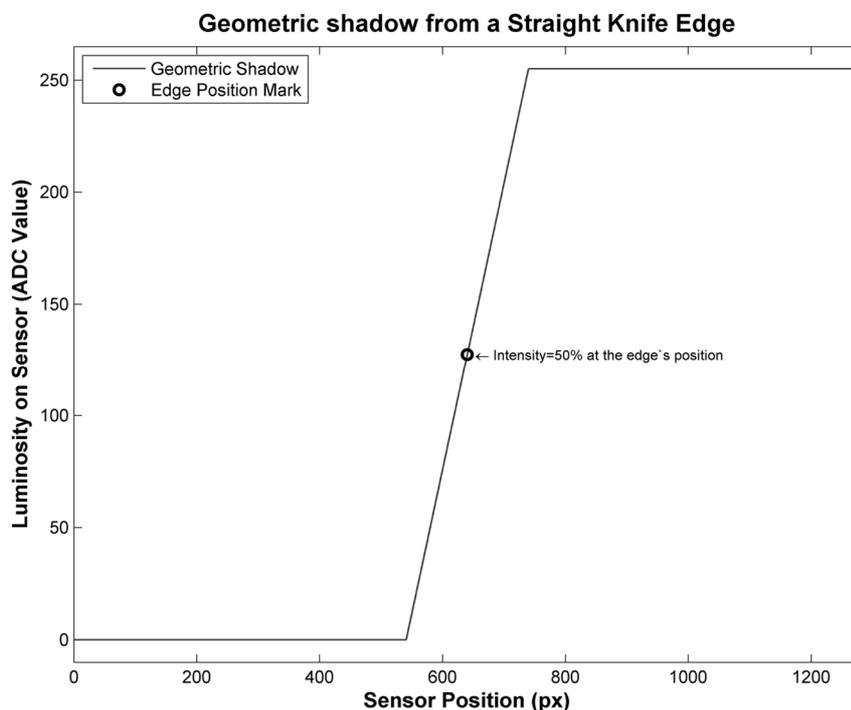


Abb. 51 - Geometrischer Schattenwurf (Orts- und Wertdiskretisiert)

Befinden sich nun alle Pixeldaten der gesamten Sensorzeile im Speicher des Mikrocontrollers kann die Kante durch einfaches Suchen des Pixels, an welchem der digitale Pixelwert >127 ist, gefunden werden. Zur Veranschaulichung führe ich das schon in den Kapiteln zuvor angeführte Beispiel an dieser Stelle weiter. Unter der Annahme dass 8000 Bilder/s verarbeitet werden müssen um 1000 Positionsdaten/s

ermitteln zu können bleiben dem Mikroprozessorsystem ca. 125µs Verarbeitungszeit pro Bild. Ohne auf Prozessordetails jetzt einzugehen, können aber folgende Schritte für den prinzipiellen Ablauf der Kantendetektion identifiziert werden:

- Datum adressieren, Laufvariable erhöhen (add)
- Lesen eines Datums aus dem Speicher (direkt/indirekt adressiert)
- Vergleich mit dem Schwellwert (z.B.: Subtraktion)
 - Sprung zur weiteren Codeausführung (z.B.: Jump if Zero)
- Sprung zum Schleifenbeginn (Jump to loop)

Für Laserlichtquellen könnte die Vorgehensweise ähnlich sein, nur mit der Randbedingung, dass der Schwellwert dabei, aufgrund der Eigenschaften einer punktförmigen und monochromatischen Lichtquelle, auf 25% gesetzt wird. Je nach Prozessorarchitektur kann das Lesen des Datums aus dem Speicher und der anschließende Vergleich mit einem Schwellwert je nach Assembling mehrere Prozessorzyklen in Anspruch nehmen. Nimmt man dafür nun also an, dass für diese sehr einfache Aufgabe auch nur 10 Instruktionen notwendig sind, so benötigt ein einfacher Vergleich bei 1280 Werten:

$$10 \text{ Instruktionen} * 1280px = 12800 \frac{\text{Instruktionen}}{\text{Kantendetektion}}$$

Unter Voraussetzung dass ein Mikrocontroller mit 200MIPS verwendet wird, kann daraus die Zykluszeit für die Verarbeitung von 12800 Instruktionen berechnet werden:

$$\frac{12800 \text{ Instruktionen}}{200 \text{ MIPS}} = 64\mu s$$

An dieser Stelle sei erwähnt, dass effiziente Suchalgorithmen eine Komplexität von $O(n) = \log(n)$ besitzen und daher auch wesentlich schneller sein können. Jedoch ist der Sensor mit 1280 Pixeln auch der kleinste im Repertoire von den ausgewählten Sensoren. Die Anzahl der Pixel erreicht bei anderen Sensortypen 5000 und mehr.

Dieses Beispiel zeigt die Problematik des hohen Datenaufkommens recht deutlich. Sollen dann zusätzlich noch Modelle des optischen Pfades oder digitale Filter verwendet werden, welche dann erst durch Faltung mit den Sensordaten Ergebnisse liefern, kann festgestellt werden, dass ein einfacher Mikrocontroller nicht mehr die gewünschte Performance liefern kann. Nachfolgend sind einige Anwendungsbeispiele in Abb. 52 dazu angeführt, welche folgende Gemeinsamkeiten aufweisen:

- Es werden Ergebnisse vorangegangener Berechnungsschritte aufsummiert
- Sie bilden die Summe über eine bestimmte Anzahl von Elementen
- Sie bestehen aus einer Serie von Multiplikationen und Additionen

Grundsätzlich kann dabei festgestellt werden, dass Operationen, wenn sie wie in diesem Fall unabhängig voneinander sind, parallelisiert werden können. Und genau dabei können digitale Signalprozessoren, kurz DSP, ihre Stärken voll ausspielen.

Algorithm	Equation
Finite Impulse Response Filter	$y(n) = \sum_{k=0}^M a_k x(n-k)$
Infinite Impulse Response Filter	$y(n) = \sum_{k=0}^M a_k x(n-k) + \sum_{k=1}^N b_k y(n-k)$
Convolution	$y(n) = \sum_{k=0}^N x(k)h(n-k)$
Discrete Fourier Transform	$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp[-j(2\pi / N)nk]$
Discrete Cosine Transform	$F(u) = \sum_{x=0}^{N-1} c(u) \cdot f(x) \cdot \cos\left[\frac{\pi}{2N} u(2x+1)\right]$

Abb. 52 - Häufige Operationen in der digitalen Signalverarbeitung [7]

2.3.3.1. DSP Systeme

DEDIZIERTE DIGITALE SIGNALPROZESSOREN (DSPs) SIND DARAUFGESICHTET, BERECHNUNGEN MIT DIGITALEN WERTEN EFFIZIENT UND SEHR SCHNELL DURCHFÜHREN. DAZU GEHÖREN UNTER ANDEREM OPERATIONEN WIE SHIFT/ADD UND MULTIPLY/ADD. DEMENTSPRECHEND IST DEREN PROZESSORARCHITEKTUR SPEZIELL DARAUFGESICHTET UND BIETET EINEN BESSEREN KOMPROMISS ZWISCHEN KOSTEN, ENERGIEAUFNAHME UND PERFORMANCE, GANZ IM GEGENSATZ ZU HANDELSÜBLICHEN MIKROCONTROLLERN¹⁶.

DAMIT EIN DSP SCHNELLSTMÖGLICH OPERIEREN KANN MUSS

- dieser mindestens 2 Werte aus dem Speicher lesen,
- Filterkoeffizienten mit Daten multiplizieren,
- Akkumulieren (+) des Multiplikationsergebnisses ($a_n * x_n$) zur Gesamtsumme,
- und all dies in einem einzigen Zyklus (oder weniger).

WIE IN ABB. 53 ZU ERKENNEN IST, STELLEN DSP ARCHITEKTUREN GENAU DIE, ZUR SCHNELLSTMÖGLICHEN ABARBEITUNG DER GENANNTEN OPERATIONEN, BENÖTIGTEN FUNKTIONSBLOCKE BEREIT:

- High-Speed Speicherarchitektur welche mehrfach Speicherzugriffe pro Zyklus erlaubt
- Mehrere Lese Busse, welche zwei oder mehr Lesezugriffe pro Zyklus erlauben
- Die Prozessorpipeline ermöglicht Befehlsausführungen in „einem Zyklus“ (Pipeline Konzept)

¹⁶ Nachfolgende Abbildungen und Gedanken sind größtenteils aus [8] übernommen und zusammengefasst.

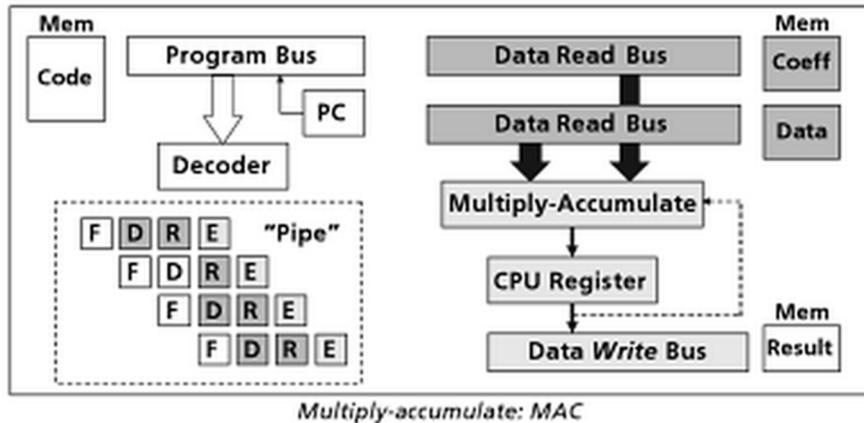


Abb. 53 - Prozessor Architektur eines DSPs [8]

Weitere Features welche die Performance eines DSP Systems erhöhen sind beispielsweise¹⁷:



- Zirkuläre Buffer
 - Automatisches zurücksetzen des Daten/Koeffizienten Pointers
- Repeat Single, Repeat Block
 - Ausführen der nächsten Instruktion oder Blocks des Programcodes ohne Schleifen-Overhead
- Numerische Probleme
 - Fix- und Gleitkomma-Probleme werden in Hardware gehandelt (z.B.: Überlauf, Runden, etc.)
- Adressierungsmöglichkeiten
 - Adresspointer besitzen ihre eigene ALU um, Pointer automatisch zu inkrementieren/dekrementieren bzw. Pointer-Offsets ohne zusätzlichen Prozessorzyklus zu erzeugen.
- Parallelisierte Instruktionausführung
 - Bis zu 8 Instruktionen in einem Zyklus möglich

Einige Mikrocontroller besitzen die Fähigkeit in Hardware zu Multiplizieren und Akumulieren (MAC Einheit), sodass dies in einem Zyklus geschehen kann. Wahre DSPs unterscheiden sich dadurch von herkömmlichen Mikrocontrollern, da diese auch in der Lage sind, beispielsweise 2 16x16bit MACs und die notwendigen Speichertransfers in einem Zyklus durchzuführen. Natürlich können alle Berechnungen, welche mit einem DSP durchgeführt werden, auch mit Mikrocontrollern welche eine oder keine eigene MAC Einheit besitzen, verarbeitet werden. Manche Hersteller von Mikrocontrollern bieten zur effizienten Lösung der in Abb. 52 angeführten Berechnungen „DSP Bibliotheken“ an, deren Anzahl an benötigten Prozessorzyklen jedoch noch immer um ein vielfaches höher als bei einem echten DSP sein wird.

¹⁷ Auszug aus [8]

Eine weitere Lösung, um benötigte Algorithmen effizient implementieren zu können, bieten FPGAs oder Full-Custom ASICs. Zweitere sind die wohl beste Variante wenn es um darum geht, das Beste Energieaufnahme-Leistungsverhältnis zu erzielen, jedoch auch die teuerste und langwierigste Methode. Einen Kompromiss bieten FPGAs, auf welchen benötigte Funktionsblöcke durch sogenannte „Glue Logic“ relativ leicht synthetisiert werden können. FPGAs sind aufgrund ihres Aufbaus etwas teurer als DSPs. Fakt dabei bleibt jedoch auch, dass für DSPs viele Entwicklungstools und Bibliotheken zu Verfügung stehen, mit denen dem Entwickler vieles erleichtert wird. Daher müssen bei Auswahl der geeigneten Architektur auch verfügbare Entwicklerressourcen, sowie Time-to-market berücksichtigt werden.

Sind die Ressourcen nur knapp und muss gleichzeitig die Entwicklungszeit auch so kurz als möglich gehalten werden, halte ich für das Messsystem den Einsatz von geeigneten DSP Systemen am sinnvollsten. Mikrocontroller Systeme können auch eine Alternative sein, vermutlich aber mangels Performance für mathematische Operationen (MAC) ein Problem werden, sobald Filter oder Kreuzkorrelationen notwendig sind. Daher sollten performante Mikrocontroller-Plattformen mit den dazu angebotenen DSP Bibliotheken jedenfalls schon vorab evaluiert und DSP-Systemen kritisch gegenübergestellt werden.

3. Systemüberblick

Zurzeit existiert ein Messsystem, welches zwar alle benötigten Funktionen bereitstellt, aber in einigen Punkten noch unzureichend arbeitet. In diesem Kapitel werden daher die wichtigsten Systemkomponenten herausgegriffen und erklärt, um einen Überblick über das gesamte Messsystem zu geben, sowie einige Implementierungsdetails etwas genauer zu beschreiben. Zuerst wurden Referenzmessungen mit einer Kante mit dem aktuellen Messsystem vorgenommen und mit einem handelsüblichen Kamerasensor verglichen. Dafür wurde eine CCD Sensorzeile, sowie eine CCD Kamera und Lichtquellen zu Verfügung gestellt, welche in Abschnitt 3.3. im Detail betrachtet werden.

3.1. Softwarekomponenten

Die benötigte Software lässt sich grob in folgende Komponenten aufteilen:

- Software am PC zur Steuerung des Ablaufs (MatLab GUI)
- Firmware am Microcontroller zum Erfassen und Übertragen von Sensordaten

Für die Messungen im Labor, welche im Abschnitt 3.3. dokumentiert sind, werden mit einem Programm in MatLab (GUI) folgende Schritte automatisiert sequentiell ausgeführt:

- Bewegen einer Referenzkante an zuvor festgelegte Positionen im X/Y Messfeld,
- Ermitteln der exakten Kantenposition ($\pm 200\text{nm}$),
- Projektion dieser mit ausgewählten Lichtquellen auf einen Sensor,
- Auslesen der Belichtungsdaten des Sensors,
- Speichern der genauen Positionsdaten und Belichtungsdaten in einem Datensatz;

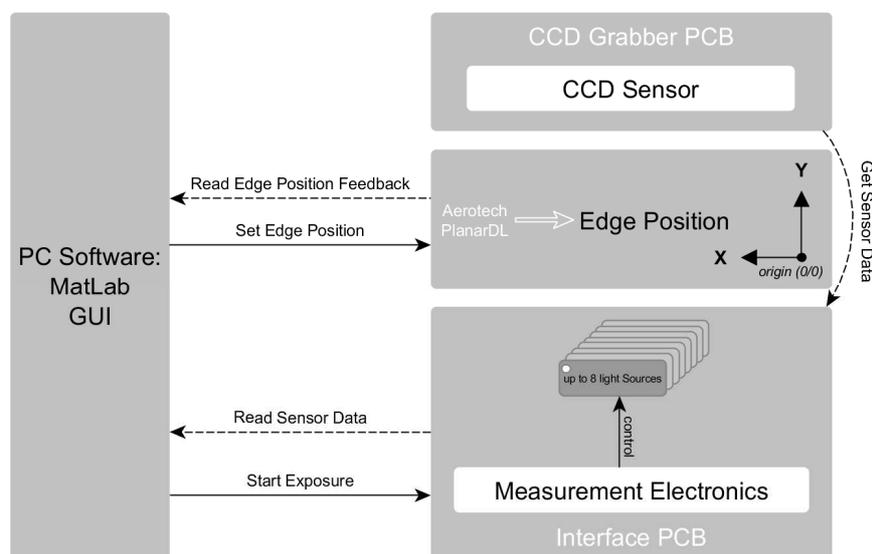


Abb. 54 - Aufgaben der PC Software

Um für spätere Kalibrieralgorithmen, zur Bestimmung der Position der Lichtquellen, sowie der Lage des CCD Sensors genügend Daten zu Verfügung zu haben, wird der zuvor beschriebene Vorgang automatisch mit mehreren hundert zuvor festgelegten Kantenpositionen durchgeführt. Alle aufgenommenen Daten werden in einem Datensatz zur weiteren Auswertung gespeichert.

3.2. Hardwarekomponenten

Bereits im Vorfeld der Masterarbeit wurden schon einige Komponenten konstruiert, aufgebaut und getestet. Die aktuell zu Verfügung stehenden Elektronikkomponenten des Messsystems lassen sich wie folgt einteilen:

- **Lichtquellen**

(zum Erzeugen einer Kantenprojektion)

- Verschiedene Laserdioden und LEDs
- Benötigte Ansteuerelektronik für die verschiedenen Lichtquellen

- **Sensoren**

(zur Aufnahme von Kantenprojektionen)

- TSL1410 (1280 Pixel je $63.5\mu\text{m}$, CCD)
- Nikon D3200 (6016x4000 Pixel je $3.9\mu\text{m}$, CMOS)

- **Microcontroller und High Speed ADC**

(zum Auslesen der Sensordaten)

- ARM Cortex M4 (STM32F407)
- MAX1192 High Speed ADC

- **Serielle Systemschnittstelle RS232**

(zur Verbindung mit einem PC)

- Messdatenübertragung (1Mbaud)

- **Analoge Industrieschnittstelle**

(zur Ausgabe der detektierten Kantenposition)

- 0-10V Ausgang
- 4-20mA Ausgang

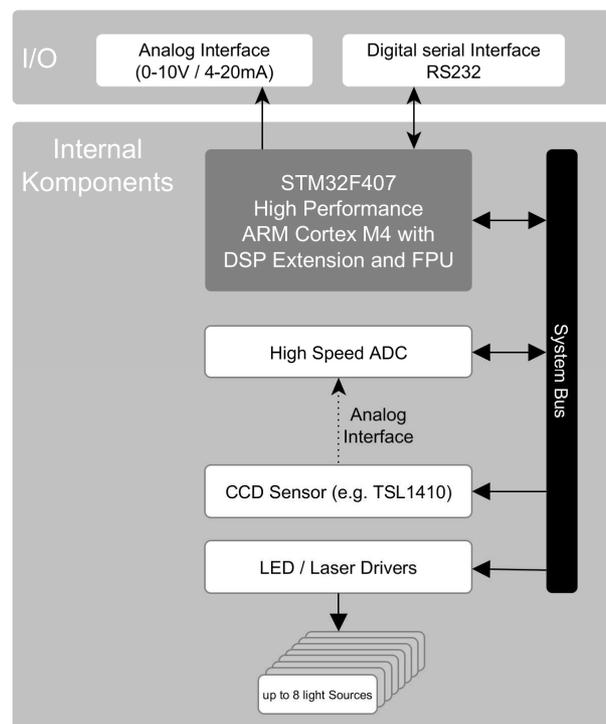


Abb. 55 - Systemkomponenten

Die Kantenposition (X/Y) soll, aufgrund den an das Messgerät gestellten Anforderungen, auch mit einer in Industrieanwendungen üblichen Schnittstelle, ausgegeben werden können. Daher sind zwei Analog-Schnittstellen, jeweils für X/Y Position separat ausgeführt, welche zwischen Spannungs- (0-10V) und Stromschnittstelle (4-20mA) per Software umgeschaltet werden können. Für die durchgeführten Messungen wurde diese Schnittstelle nicht benötigt und wird auch im Rahmen dieser Arbeit nicht genauer betrachtet.

Der verfügbare CCD Sensor (TSL1410) wurde, aufgrund der räumlichen Trennung von Sensor und Lichtquellen, mit Microcontroller und ADU auf einer Platine (*CCD Grabber Board*) platziert. Die Erzeugung der Versorgungsspannungen und die zur Ansteuerung der Lichtquellen benötigten Elektronikkomponenten wurden auf einer zweiten (*CCD Interface Board*) integriert. Diese beiden Platinen werden über ein Flat-Flex-Cable (FFC) verbunden.

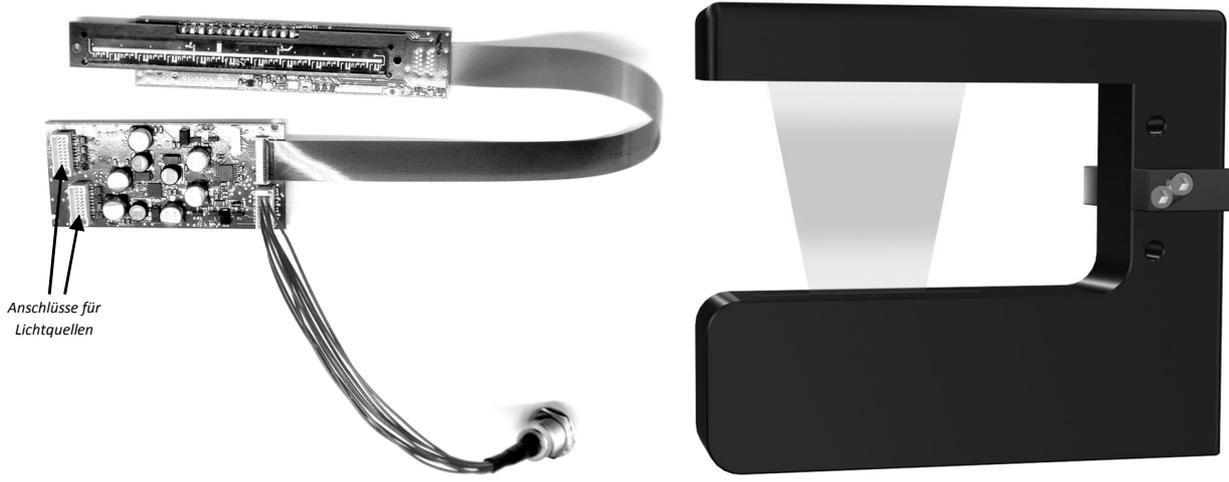


Abb. 56 - Aktuelles Messsystem

Zusätzlich zu den Elektronikkomponenten existiert schon eine Gehäusevariante, in welcher die Elektronik Platz findet. Zur besseren Veranschaulichung ist dieses in Abb. 56 dargestellt. Der Abstand zwischen den Lichtquellen und dem Sensor beträgt in dieser Gehäusevariante 70mm.

Der Messaufbau im Labor verwendet zur Bewegung einer Referenzkante (Straight Edge) im 2D Messfeld einen sogenannten Präzisionstisch¹⁸, sodass die relativen Abstände zwischen den aufgenommenen Kantenpositionen mit sehr hoher Genauigkeit bekannt sind. Wie schon in Abschnitt 3.1. erwähnt, werden diese besonders genauen Kantenpositionen zusätzlich durch spezielle Feedback-Elektronik des Präzisionstisches ermittelt (Unsicherheit der Positionsdaten: +/- 200nm) und zur weiteren Verwendung für einen Kalibrieralgorithmus gespeichert. Die Fehler, welche durch ungenaue Bewegung der Kante, respektive durch die „ungenauen“ relativen Kantenpositionen, in dieser Kalibrierung entstehen, sind aufgrund der hohen Präzision nur sehr gering und können daher vernachlässigt werden. Abb. 57 zeigt eine solche Referenzkante sowie den verwendeten Präzisionstisch.



Abb. 57 - Straight Edge links und PlanarDL-200XY rechts

¹⁸ [Aerotech PlanarDL-200XY](#)

3.2.1. Verfügbare Sensoren

Prinzipiell existiert eine Vielzahl an CCD und CMOS Zeilensensoren, welche grundsätzlich auch verfügbar wären, jedoch spielen Abnahmemenge, Lieferzeit und nicht zuletzt auch die Stückkosten eine entscheidende Rolle. Durch die zunehmende Zahl an Kamerageräten steigt die Nachfrage an 2D Sensorarrays stark und besonders monochrome Zeilensensoren werden daher nur mehr für wenige Nischenanwendungen benötigt. Daher wurden im Vorfeld der Arbeit durch lange Recherche geeignete Sensoren ausgewählt. Konkret wurden für die Masterarbeit folgende Sensoren zur Durchführung von Messungen benutzt:

<i>Sensor</i>	<i>Hersteller</i>	<i>Typ</i>	<i>Sensorenlänge</i>	<i>Pixelgröße</i>	<i>Pixelabstand (Center-Center)</i>	<i>Pixelanzahl</i>
TSL1410	AMS ¹⁹	CCD	81,28mm	63,5 x 55,5 μ m	63,5 μ m	1280
D3200	Nikon	CMOS	23,2mm	3,85 x 3,85 μ m	3,85 μ m	6016 (x4000)

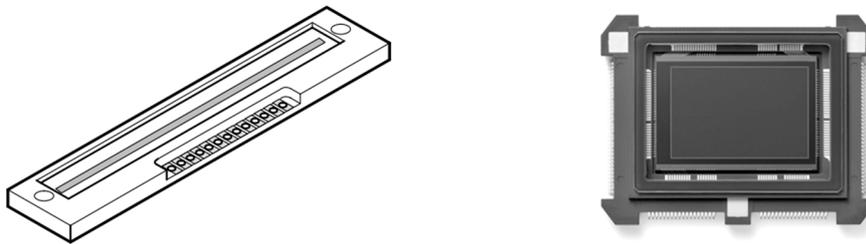


Abb. 58 - TSL1410²⁰ und Nikon D3200 Sensor²¹

Wie schon in Abschnitt 2.3.2. festgestellt wurde ist es sinnvoll, dass hoch auflösende Sensoren mehrere parallele Analogausgänge besitzen, um durch die hohe Anzahl der Pixel kurze Auslesezeiten gewährleisten zu können. Der TSL1410 besitzt zwei Ausgänge, welche mit einer Taktfrequenz von 8MHz ausgelesen werden können. Aufgrund der unterschiedlichen Größe verschiedener CCD Sensoren, sowie deren Gehäusebauform (Abb. 58 - TSL1410) und der elektrischen Sensorparameter, ist im Normalfall für jeden Sensor ein grundsätzlich anderer Aufbau der CCD-Grabber-Platine notwendig.

Auch im Hinblick auf die spektrale Empfindlichkeit sind CCD Sensoren sehr unterschiedlich und können ihre maximale Empfindlichkeit bei Wellenlängen von unter 100nm bis hin zu mehreren 1000nm besitzen. Die maximale Empfindlichkeit des TSL1410 (Abb. 59) liegt bei ca. 780nm (Infrarot). Daher ist es unerlässlich, dies bei der Auswahl einer geeigneten Lichtquelle zu berücksichtigen.

¹⁹ [Austria Micro Systems AG](#)

²⁰ Datenblattauszug [TSL1410R](#)

²¹ Auszug der Produktspezifikation - [Nikon D3200](#)

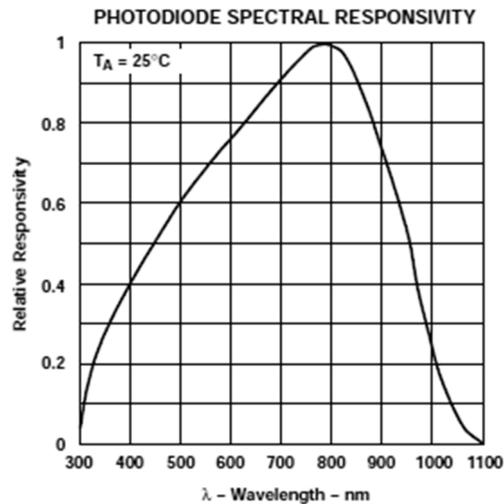


Abb. 59 - Spektrale Empfindlichkeit TSL1410²⁰

Für den Anschluss verschiedener Lichtquellen konnte immer dasselbe Interface Board verwendet werden, da zum Aktivieren der einzelnen Lichtquellen nur einfache P-Kanal MOSFETs verwendet wurden.

Damit bei der Verwendung von LEDs und Laserdioden immer derselbe Strom, unabhängig von Betriebs-Temperatur und Spannung fließt, werden normalerweise sog. Treiberbausteine verwendet. Im Fall unseres Laboraufbaus wurde, aufgrund der konstanten Umgebungsbedingungen, kein zusätzlicher Treiber verwendet, sondern der Strom nur mit einem passenden Vorwiderstand begrenzt. Bei der LED wurde dieser so gewählt, dass der Strom knapp unter dem maximal zulässigen liegt, beim Laser hingegen ist dieser anders dimensioniert, sodass sich ein Strom knapp über dem Thresholdstrom der Laserdiode einstellt, da sich damit bei der verwendeten Laserdiode eine besonders günstige Lasermode ausbildet (Details dazu sind in den Abschnitten 3.3. , 3.2.2. und 3.3. angeführt). Für unseren Messaufbau im Labor haben sich diese sehr einfachen Varianten als adäquate Lösung erwiesen. Im Feldeinsatz mit stark schwankenden Temperaturen, welche zwischen 0 und 50°C liegen können ist es jedoch unumgänglich, dass spezielle Treiber verwendet werden müssen um den Strom konstant zu halten.

3.2.2. Verfügbare Lichtquellen

Zur Belichtung einer Kante standen mehrere Lichtquellen in verschiedenen Ausführungen zu Verfügung. Diese wurden zuerst mit Hilfe des angesprochenen Kamerasensors schon vorab ausgewertet, um eine Aussage über Reflexionen am Gehäuse der Lichtquelle, Brechungseffekte an der Grenzfläche und Richtcharakteristik treffen zu können. Die ideale Lichtquelle beleuchtet den gesamten relevanten Sensorbereich mit nahezu konstanter Helligkeit und ausreichender Intensität, sodass kurze Belichtungszeiten möglich werden, denn nur dann ist eine aufwändige Projektionsoptik nicht notwendig.

Aus diesem Grund wurde zuallererst die schon erwähnte Referenzkante an mehrere Positionen im Messfeld der Kamera bewegt, damit anschließend die verschiedenen Lichtquellen gegenübergestellt werden können. Von den relevanten Lichtquellen sind in diesem Abschnitt ausgewählte Messungen sowie einige Parameter nachfolgend dokumentiert.

3.2.2.1. LED

Bei den LED Lichtquellen ist die Richtcharakteristik bzw. die Lichtstärkeverteilung, in der Regel sehr stark von der Gehäuseform abhängig. Daher versuchen einige Hersteller durch spezielle Gehäuseformen und/oder Kunststoff Vergussmassen, welche eigentlich zum Schutz des Halbleiters vorgesehen sind, schon Linsen zu formen, welche denselben Halbleiterdioden eine andere Ausbreitungscharakteristik verleihen können.

Die größten Unterschiede in den Messergebnissen werden durch die Abmessungen der Halbleiterdioden bestimmt. Mit sehr kleinen Seitenlängen des Halbleiters, respektive kleiner lichtemittierender Fläche, können ähnliche Beugungsmuster wie sie mit einer punktförmigen monochromatischen Lichtquelle entstehen würden, erzeugt werden. Warum das hilfreich sein kann wird im 4. Kapitel genauer erläutert.

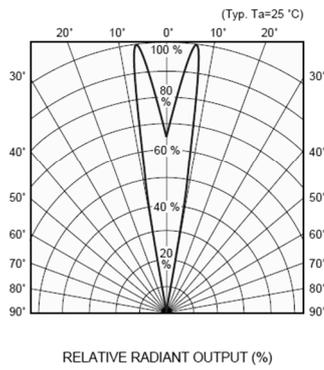
Hamamatsu L8957 – Infrared LED

Diese IR LED zeichnet sich durch die recht hohe Belastbarkeit und sehr spezielle Lichtstärkeverteilung aus. Durch diese spezielle Richtcharakteristik wird eine nahezu homogene Ausleuchtung des beleuchteten Schirmbereichs erreicht (Abb. 61).

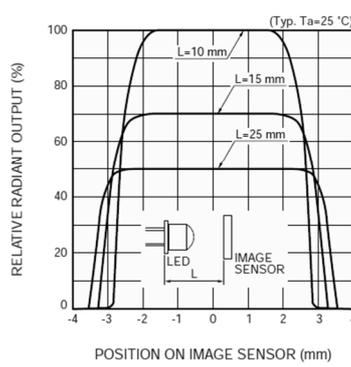


Abb. 60 - Hamamatsu L8957 – Bauteil

■ Directivity



■ Light intensity distribution



■ Emission spectrum

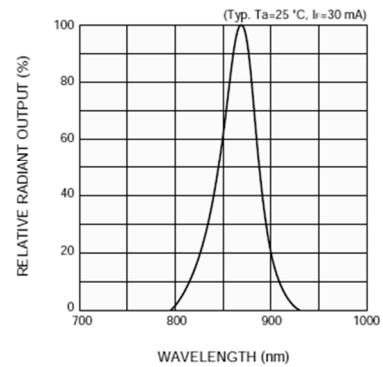


Abb. 61 - Hamamatsu L8957 - Lichtstärkeverteilung, Leuchtdichteverteilung und emittiertes Spektrum²²

In Abb. 61 erkennt man, dass das emittierte Spektrum seine Peak-Wellenlänge bei 870nm (typ.) hat und eine spektrale Halbwertsbreite von 45nm besitzt. Der Messaufbau mit dem Kamerasensor wurde so gewählt, sodass der gesamte Sensorbereich ausgeleuchtet wird. Dann wurden, wie schon erwähnt, einige Belichtungen mit verschiedenen Kantenpositionen aufgenommen. Aus dem Bild des Kamerasensors (4000x6016 Pixel) ist für drei Positionen, in welchen der Abstand der Kante zum Sensor kontinuierlich verringert wurde, eine einzige Zeile (1x6016 Pixel) extrahiert worden. Dies wird in Abb. 62 dargestellt. Die Abstände der Kante zum Sensor betragen in diesem Aufbau zwischen ca. 10cm (Image 2) und 4cm (Image 25). Dabei erkennt man, wie schon aus den Simulationen, dass der Schatten, bedingt durch die Größe des lichtemittierenden Punktes, mit zunehmendem Abstand der Kante vom Sensor immer breiter wird. Die Beleuchtung ist, wie erwartet, im sichtbaren Sensorbereich nahezu konstant.

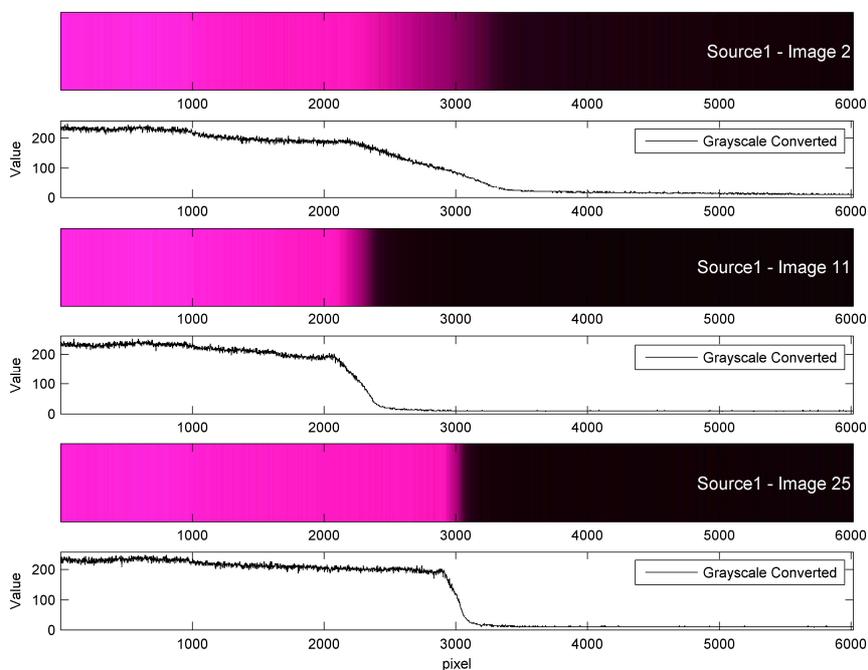


Abb. 62 - Belichtung des Kamerasensors (Hamamatsu L8957)

²² Auszug aus dem Datenblatt der [Hamamatsu L8957](#)

Hamamatsu L10596-03 – Infrared LED

Diese LED besitzt eine besonders breite Abstrahlcharakteristik bei gleichzeitig sehr geringer lichtemittierender Fläche. Durch diese breite Charakteristik könnten wesentlich größere Sensoren ausgeleuchtet werden. Da sich diese LED von der zuvor erwähnten hauptsächlich durch die Linsenform und Größe der Halbleiterdiode unterscheidet, jedoch die emittierte Lichtleistung im selben Größenordnungsbereich liegt, verteilt sich aber folglich die abgestrahlte Lichtleistung auf einen sehr viel größeren Bereich. Daraus ergibt sich, dass die Beleuchtungsstärke am Sensor dadurch deutlich geringer wird.



Abb. 63 - Hamamatsu L10596-03

In Abb. 64 kann man erkennen, dass das emittierte Spektrum seine Peak-Wellenlänge, wie schon die zuvor erwähnte Diode, bei 870nm (typ.) hat und eine spektrale Halbwertsbreite von 35nm (lt. Datenblatt) besitzt.

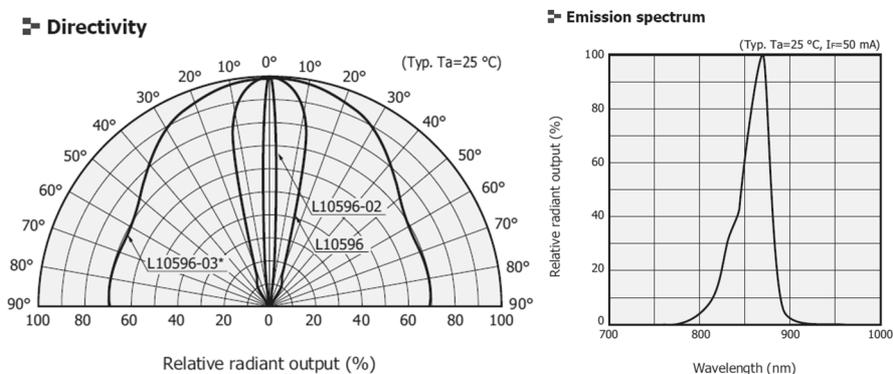


Abb. 64 - Lichtstärkeverteilung und emittiertes Spektrum (Hamamatsu L10596-03)²³

Abb. 65 zeigt die Belichtung mit dieser LED. Auffallend ist das besonders stark ausgeprägte Beugungsmuster wenn die Kante dem Sensor nahe ist. Dies deutet auf die sehr geringe Größe der Halbleiterdiode hin. Um gute Abbildungen von Kanten mit hoher Dynamik im Bild zu erhalten, wurde die Belichtungszeit des Sensor angepasst. Daher kann hier kein Intensitätsunterschied zur Abb. 62 festgestellt werden. Bei gleicher Belichtungszeit wurde festgestellt, dass diese LED jedenfalls zu leistungsschwach ist, um den Sensor ausreichend stark zu beleuchten. Hier würden aber vermutlich

²³ Auszug aus dem Datenblatt der [Hamamatsu L10596-03](#)

sehr einfache Optiken zur Fokussierung des Strahls auf die Sensorzeile schon ausreichen um die notwendige Beleuchtungsstärke am Sensor zu erreichen.

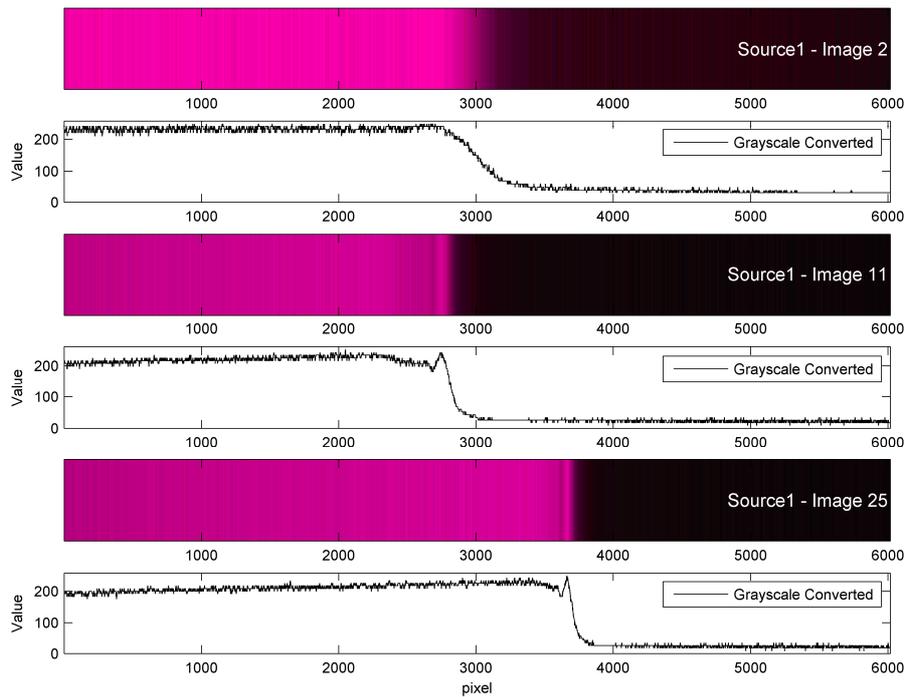


Abb. 65 - Belichtung des Kamerasensors (Hamamatsu L10596-03)

Osram SFH4255

Einer nach Lambert strahlenden Lichtquelle kommt diese von allen Betrachteten am nächsten. Mit einer Halbwertsbreite von 120° stellt diese sehr preiswerte Hochleistungs-LED gegenüber den bisher erwähnten Typen eine wirkliche Alternative dar. Denn wenn die emittierte Lichtleistung groß genug ist, kann auch eine sehr breite Lichtstärkeverteilung den Sensor ausreichend beleuchten, sodass keine zusätzliche Optik benötigt wird. Da in dem nachfolgend abgebildeten LED Gehäuse (Abb. 66) nicht nur diese Variante in Infrarot, sondern auch mit vielen anderen Wellenlängenbereichen verfügbar ist, wurden einige verschiedene Varianten getestet. Bei den Varianten mit sichtbarem Licht ist folgendes besonders aufgefallen: Betrachtet man die LED während diese aktiv ist, so empfindet man nicht nur den lichtemittierenden Halbleiter in der Mitte des Gehäuses als sehr hell, sondern auch den ganzen Bereich rund um den Halbleiter herum. Daher wurde die Vermutung angestellt, dass nicht nur die Halbleiterdiode alleine (0,3x0,3mm), sondern die gesamte Fläche hinter der Diode eine wichtige Rolle für die Belichtung spielen könnte, da Licht an der Grenzfläche der transparenten Kunststoff Vergussmasse zur Luft zurück und dann vom weißen LED Gehäuse wieder nach vorne reflektiert wird. Genauer wird dies noch im 4. Kapitel analysiert.



Abb. 66 - Osram SFH4255

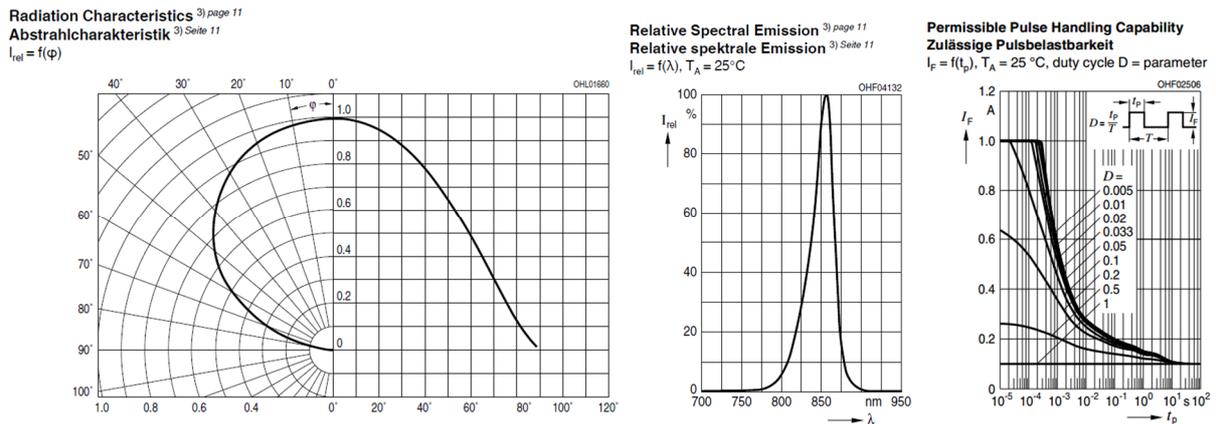


Abb. 67 - Lichtstärkeverteilung, Leuchtdichte, emittiertes Spektrum und Pulsbelastbarkeit (Osram SFH4255)²⁴

Wie schon erwähnt ist die Impulsbelastbarkeit bei dieser LED besonders hoch. Im dazugehörigen Diagramm in Abb. 67 erkennt man, dass schon bei Raumtemperatur die LED bei den maximal möglichen Belichtungszeiten (125us pro LED bei Belichtung mit 8 Lichtquellen entspricht einem Tastverhältnis von 0,125) nur noch mit 70% des maximalen Impulsstromes betrieben werden kann. Eine Verkürzung der Belichtungszeit würde daher eine Erhöhung des maximalen Impulsstromes bedeuten, sodass sich in der Belichtung für den Sensor durch die erhöhte Lichtstärke keine Dynamikeinbußen bemerkbar machen. Dies sollte jedenfalls mit Versuchen und Messungen im Labor evaluiert werden. Wie auch bei den zuvor vorgestellten LED Typen ist in Abb. 68 die Belichtungszeit des Kamerasensors so gewählt, dass die aufgenommenen Kantenprojektionen den Dynamikbereich des Sensors gut ausnützen. Besonders fallen flache Bereiche vor dem steileren Anstieg auf. Dieser Effekt lässt sich teilweise durch die angesprochenen Reflexionen an der Grenzfläche begründen und wird, wie bereits erwähnt, später noch genauer betrachtet.

²⁴ Auszug aus dem Datenblatt der [Osram SFH4255](#)

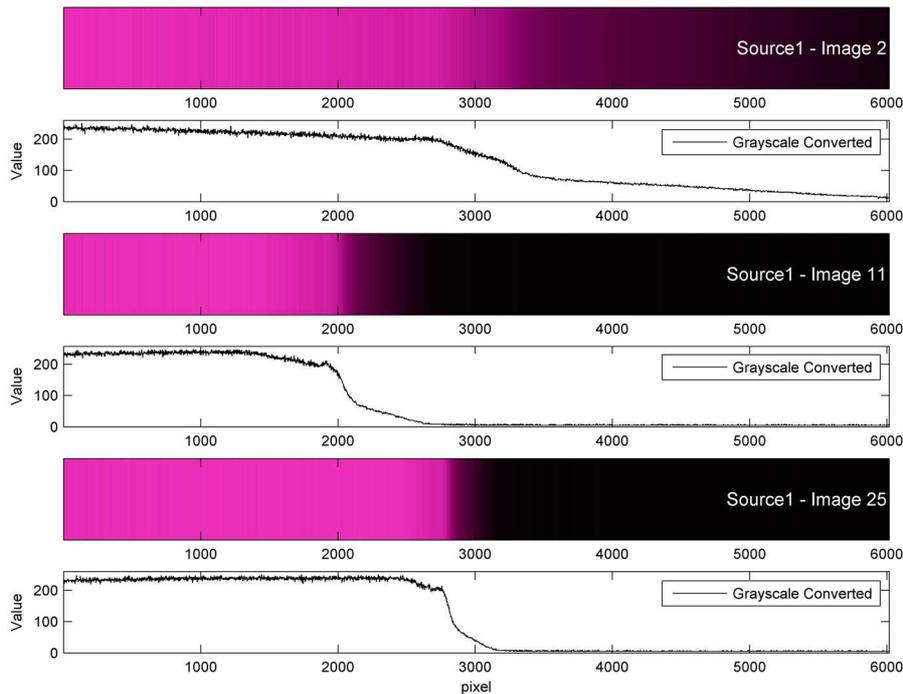


Abb. 68 - Belichtung des Kamerasensors (Osram SFH4255)

Vergleich der vorgestellten LED Lichtquellen

Bei genauer Betrachtung kann festgestellt werden, dass die Hamamatsu-Lichtquellen gegenüber der Osram-Variante wesentlich weniger Reflexionen an der Grenzfläche zur Luft und anschließender erneuter Reflexion des Lichts am Trägermaterial in Richtung des Sensors aufweisen. Der Vergleich im Labor mit noch weiteren Lichtquellen bestätigte hier die wesentlich besseren Eigenschaften der Hamamatsu Typen. In Abb. 69 ist dieses Verhalten der Osram-LED bei einer Belichtung nochmals genauer gekennzeichnet. Die interessanten Bereiche sind darin markiert. Die durch die Halbleiterdiode hervorgerufene direkte Projektion ist der etwas steilere, hervorgehobene Anstieg in der Mitte. Würde es keinerlei Reflexionen am LED Gehäuse geben, würde die Projektion gänzlich anders aussehen und den Hamamatsu Typen stärker ähneln.

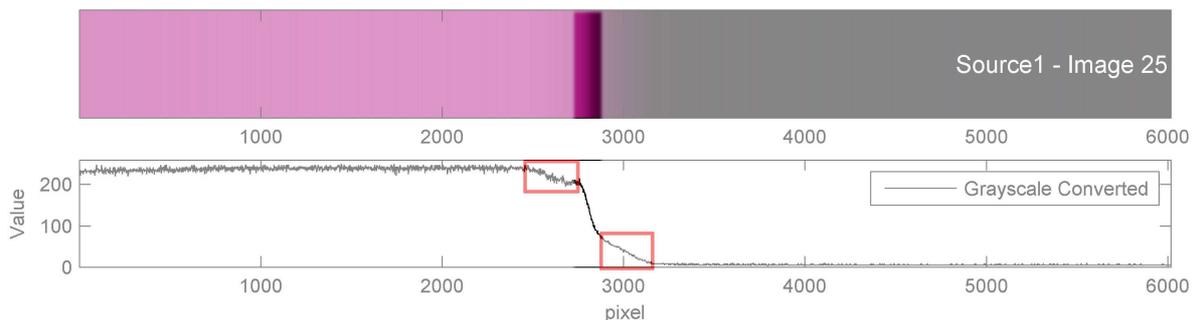


Abb. 69 - Osram SFH4255 Belichtungsteilbereiche

Da die Osram-LED hervorragende Eigenschaften bezüglich des Abstrahlwinkels und der Beleuchtungsstärke des Sensors für den Messaufbau besitzt, wurde bei Messungen mit dem CCD Sensor festgestellt, dass es für diese Lichtquelle nicht notwendig ist, eine aufwändige Optik zu konstruieren. Die Montage dieser LED kann außerdem gegenüber den Hamamatsu-Typen während

des SMD Bestückungsprozesses vollautomatisch erfolgen. In den nachfolgenden Kapiteln wird daher aus genannten Gründen vorerst nur die Osram LED genauer betrachtet, da versucht werden soll ein Modell zu finden, welches die Eigenschaften dieser Lichtquelle ausreichend genau beschreibt. Eine weitere Idee dabei ist, dass man, sofern die auftretenden Effekte gut modellierbar sind, dieses Modell auch auf jede beliebige weitere LED anwenden kann.

3.2.2.2. Laserdioden

Wie schon mit den LEDs wurden auch mit Laserdioden im selben Messaufbau mit der Kamera Bilder aufgenommen. Stellvertretend für verschiedene Laserdioden ist nachfolgend die Aussichtsreichste zur Verwendung im Serienprodukt angeführt, da bei dieser sich in einem bestimmten Betriebsmodus eine Lasermode einstellt, welche es ermöglicht, auch ohne zusätzliche Optik gute Belichtungen des Sensors zu erzielen.

Arima ADL65055TL

In den bisherigen Prototypen wurde eine Laserdiode von Arima als Lichtquelle mit zusätzlicher Kollimatoroptik und einer anschließenden Streulinse verwendet. Der Aufbau dieses Linsensystems, die schwierige Justierung, sowie die Bauform der Laserdiode machen eine einfache Montage nahezu unmöglich.

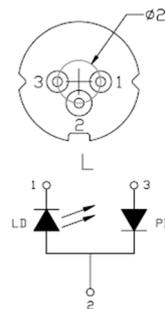


Abb. 70 - Arima ADL65055 Pinout und Anschlussbelegung²⁵

Wie schon angemerkt wurde ist für den Betrieb einer Laserdiode normalerweise ein Treiberbaustein notwendig, welcher, durch Rücklesen der im Gehäuse integrierten Monitordiode, die optische Leistung für den gesamten Betriebstemperaturbereich konstant halten kann. Die Regelung erfolgt durch das emittierte Laserlicht, welches in der Monitordiode einen Strom proportional zur ausgesendeten Lichtleistung hervorruft. In Abb. 71 ist dieses Verhalten gut erkennbar. Würde man die Temperatur von 50°C auf 25°C absenken, ohne den Strom zu regeln, hätte man eine um ein Vielfaches höhere Ausgangsleistung, welche im schlimmsten Fall zur sofortigen thermischen Zerstörung des Halbleiters führt. Durch das Feedback der Monitordiode kann dies effektiv verhindert werden.

²⁵ Auszug aus dem Datenblatt der [Arima ADL65055](#)

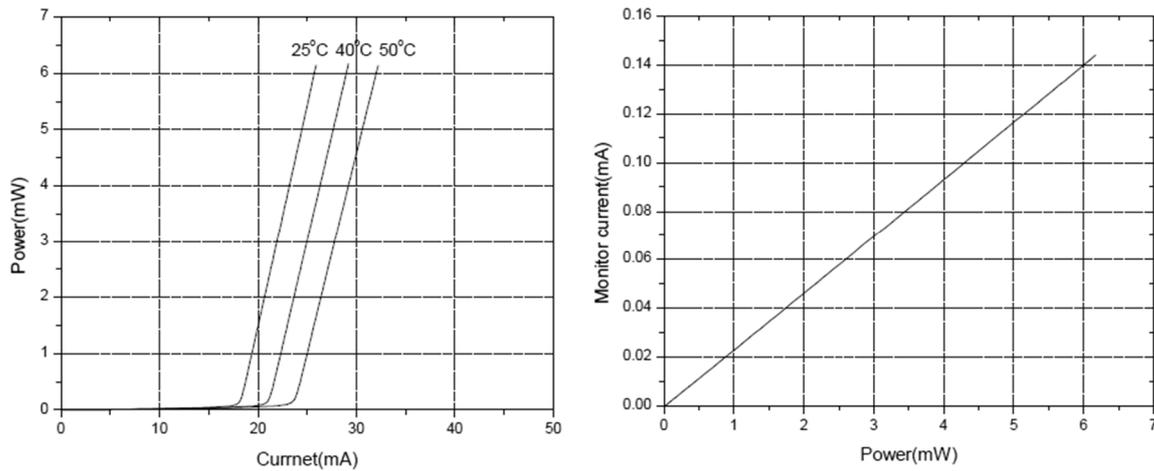


Abb. 71 - Ausgangsleistung des Lasers (Temp.) und Strom der Monitordiode (P_{out})²⁵

Nachfolgend wurde für Abb. 72 der Kamerasensor mit der Laserdiode alleine, ohne Kollimatoroptik und Streulinse, belichtet und eine Zeile desselben ausgewertet.

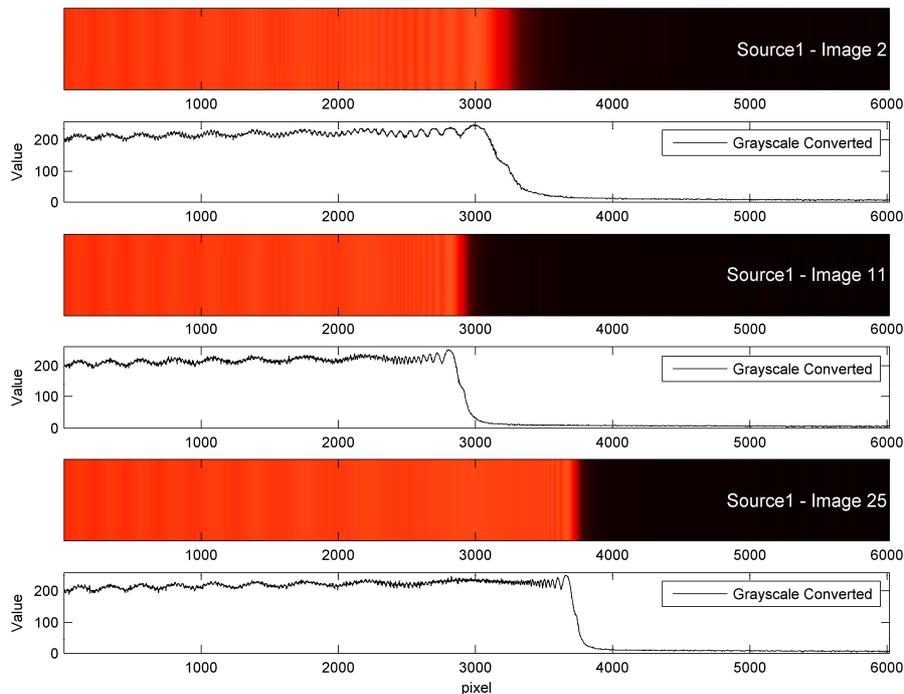


Abb. 72 - Belichtung des Kamerasensors (Arima ADL65055TL)

Es lässt sich die Ausprägung des Beugungsmusters, welches durch die in Näherung punktförmige Laserlichtquelle durch die Kante erzeugt wird, gut erkennen. Es fällt jedoch auf, dass nicht das ideale Beugungsmuster entsteht. Besonders in Image 2 sind die Maxima sehr abgeflacht. Dies wurde leider erst während der Dokumentation der Messungen bemerkt und liegt daran, dass der rote Farbkanal der Kamera schon gesättigt war.

Bei Auswertung am CCD Sensor (TSL1410) ist aufgefallen, dass diese Laserdiode besonders starkes Speckle Noise produziert. Dies ist in der nachfolgenden Abb. 73 dargestellt.

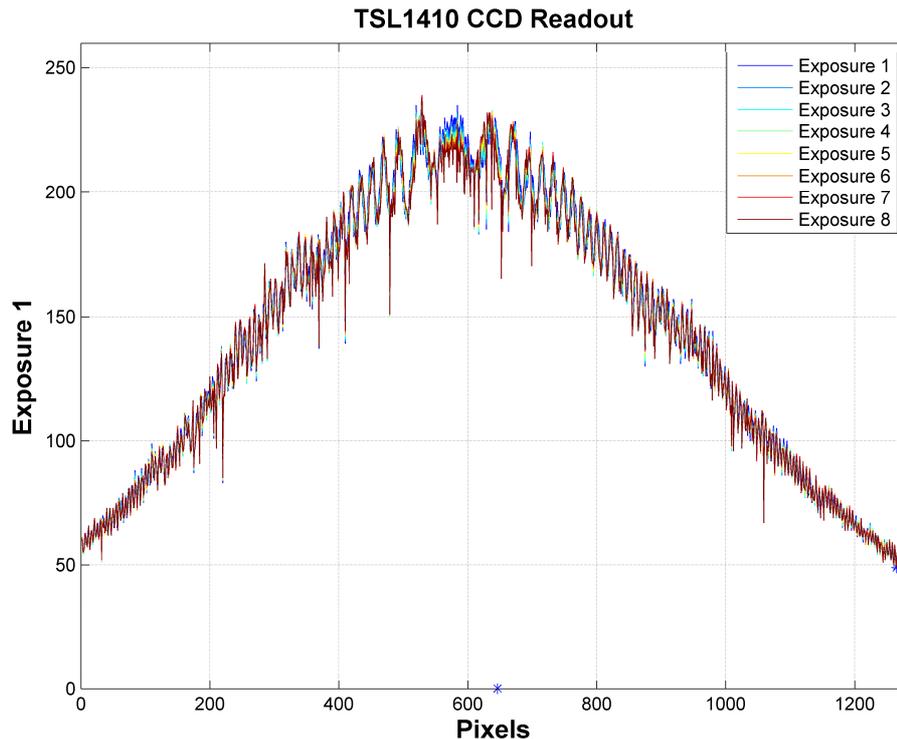


Abb. 73 - Speckle Noise am CCD Sensor (ADL65055TL)

Rohm RLD2WMFR1

Anders als bei den LEDs ist bei den Laserdioden die Lichtstärkeverteilung von der Lasermode abhängig, welche wiederum in direktem Zusammenhang mit den, durch den Diodenstrom stark beeinflussten, physikalischen Effekten steht. Daher ist es auch nicht unmittelbar zielführend den Strom stark zu erhöhen, da ohne Kollimator-Linsensystem die Beleuchtungsstärke durch die Änderung der Lasermode auch in Bereichen neben der CCD Zeile stärker zunehmen kann und im Extremfall dadurch keine Steigerung der Beleuchtungsstärke am Sensor erzielbar ist. Weiters nimmt auch das durch die Kohärenz des Laserlichts hervorgerufene, Speckle Noise stark zu. Da dieses aber auch von der Oberflächenbeschaffenheit des bestrahlten Materials abhängt, wird Speckle Noise in Abschnitt 3.3. mit dem verfügbaren CCD Zeilensensor genauer betrachtet.



Abb. 74 - Rohm RLD2WMFR1²⁶

In Abb. 74 ist eine Besonderheit dieser Laserdiode angeführt. Zwei Laserdioden sowie die notwendige Photodiode sind auf einem einzigen Halbleiter integriert. Daher besitzt diese Ausführung auch 4 Anschlüsse. Die beiden Laserdioden können nicht simultan betrieben werden.

Da es sich bei diesem Laser außerdem um einen sehr speziellen handelt, welcher seine Wellenlänge durch ein spezielles Verfahren (self-pulsation) ständig ändert, sodass sich ein Spektrum mit einer

²⁶ Auszug aus einem Datenblatt der [Rohm RLD2WMFR1](#)

Halbwertsbreite von mehr als 1nm ergibt, ist auch das Speckle Noise nicht so stark ausgeprägt wie bei extrem schmalbandigen Lasern.

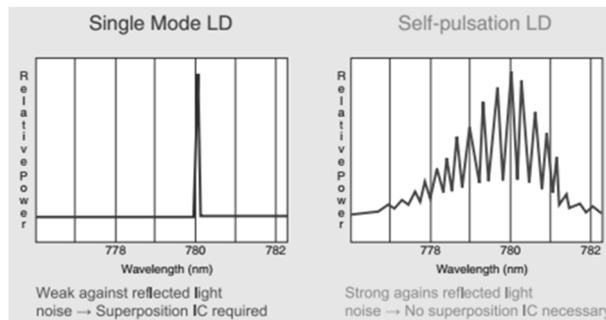


Abb. 75 - Spektrum einer herkömmlichen Laserdiode (links) und Rohm RLD2WMFR1 (rechts)²⁶

Für Abb. 76 wurde wieder eine Zeile des Kamerasensors ausgewertet. Besonders gut erkennt man dabei die Ausprägung des Beugungsmusters, welches durch die nahezu punktförmige Laserlichtquelle durch die Kante erzeugt wird.

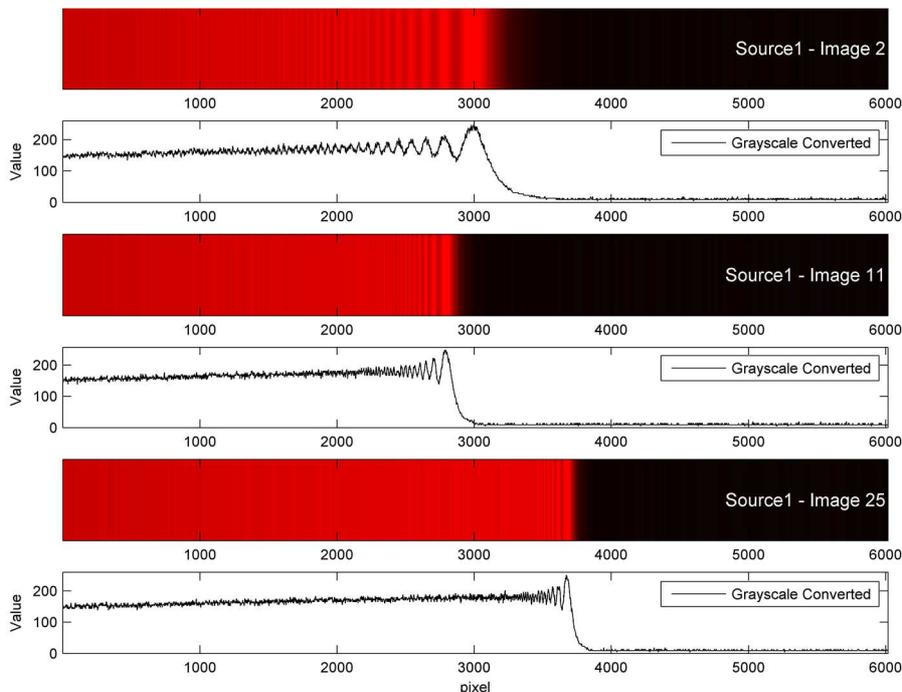


Abb. 76 - Belichtung des Kamerasensors (Rohm RLD2WMFR1)

Vergleich der Laserdiode mit einer LED

Laserdioden besitzen gegenüber den LEDs entscheidende Vorteile, was die Projektion von Kanten auf den Sensor betrifft. Das Modell, welches mit ausreichender Genauigkeit durch gute Näherungslösungen (Fresnel Integrale) beschrieben wird, kann bei eben dieser punktförmigen Lichtquelle sehr gute Ergebnisse liefern. Das heißt, die Projektion auf den Sensor entspricht mit großer Übereinstimmung den durch das Modell erzeugten Abbildungen.

LEDs hingegen sind in sehr großen sowie auch Musterstückzahlen wesentlich besser verfügbar. Bei preiswerten Laserdioden ist es zudem oftmals nicht einmal möglich, diese überhaupt in Musterstückzahlen (<1000Stk.) zu beschaffen. Die Langzeitverfügbarkeit solcher Laserdioden muss auch

überprüft werden, da besonders günstige Laserdioden oft nur einmalig in extrem großen Losen produziert werden und daher eine Beschaffung, wenn diese nicht mehr lagernd sind, bei Abnahmemengen unter mehreren 100000 Stück unmöglich wird. Bei LEDs stellt sich diese Problematik nicht. Laserdioden welche Langzeitverfügbarkeit besitzen und auch in kleinen Mengen beschaffbar sind, schließen sich ob ihres hohen Preises damit aus.

Ein weiterer großer Vorteil der Osram LED besteht, wie schon angemerkt wurde, in der einfachen Verarbeitbarkeit. Bei Laserdioden ist die Verfügbarkeit von vollautomatisch bestückbaren SMD Packages prinzipiell noch sehr gering. Für die Rohm Laserdiode muss beispielsweise, im Gegensatz zur vollautomatischen Bestückung einer LED, nicht nur ein sehr aufwändiger Platinenaufbau (aufgrund der Hauptrichtung der ausgeprägten Lasermode) entwickelt, sondern auch in der Handhabung mit dieser besonders vorsichtig gearbeitet werden um diese nicht schon vor Einbau in das Messgerät zu beschädigen, da die Bonddrähte des Halbleiters bei dieser Laserdiode frei liegen und dadurch leicht berührbar sind.

Soll sehr präzise gemessen werden, so hat der Laser gegenüber der LED vermutlich einen Vorteil die Störfestigkeit des Kantenbildes betreffend, da in jedem Fall das Beugungsmuster stark ausgeprägt ist und daher auch bei recht großen Störeinflüssen noch immer detektiert werden kann. Im Detail wird dies aber im Kapitel 4 besprochen.

3.2.3. Analoge Signalkonditionierung

Als Auszug aus der gesamten benötigten Schaltungstechnik möchte ich hier den analogen Teil der Signalkonditionierung vorstellen. Wie schon in Abschnitt 2.3.2. festgestellt wurde sind schnelle Analog-Digital-Umsetzer oft mit differentiellen Eingängen ausgeführt. Da aus früheren Versionen des Messgerätes schon eine funktionierende Schaltungsvariante vorlag, wurde diese auch in diesem Aufbau ähnlich implementiert. Diese besteht aus einem MAX1192 ADU (dual 8-bit differential ADU mit 22MSamples) und pro Kanal einem AD8138 zur differentiellen Aufbereitung des Signals, da die analogen Ausgänge des TSL1410 nicht differentiell ausgeführt sind.

In Abb. 77 ist eine Beispiel-Implementation dargestellt. Dabei wird eine Common Mode Spannung (V_{OCM}) durch den ADU vorgegeben, da die Mittenspannung meist durch diesen festgelegt wird. Die Ausgänge werden dann vom OPV so gesteuert, sodass diese genau diese angelegte Gleichtaktspannung aufweisen. Für das Single-ended Signal kann dann auch noch die Verstärkung über die Widerstände so eingestellt werden, sodass der gesamte Dynamikbereich des ADUs (MAX1192 - +/-0,512V, bei Verwendung der internen Bandgap-Referenz) ausgenutzt wird. Die Werte der Widerstände hängen von Dunkelspannung, Beleuchtungsstärke sowie Belichtungszeit des CCD Sensors und auch vom emittierten Spektrum der verwendeten Lichtquelle ab, denn all diese Faktoren beeinflussen den Dynamikbereich der Spannung, welche an den Analogausgängen des CCD Sensors ausgegeben wird. Daher ist es erforderlich diese Werte für die Serienfertigung mit Sorgfalt zu bestimmen, um nicht durch auftretende Beugungserscheinungen, welche, wie schon in den Grundlagen bemerkt wurde, durch konstruktive Interferenz der Lichtwellen Beleuchtungsstärken erzeugen können, die durchaus größer sein können als in dem Fall wenn sich keine Kante im Messfeld befinden würde.

Zusätzlich dazu kann das differentielle Signal durch den Einbau von einfachen RC Tiefpässen auf den Leitungen zum AD Umsetzer nach dem OPV bandbegrenzt werden, um einen größeren Signal-Rauschabstand zu erzielen.

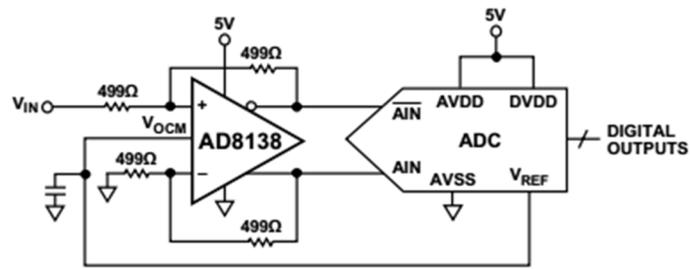


Abb. 77 - analoge Signalkonditionierung (Funktionsprinzip)²⁷

²⁷ Ausschnitt aus AD8138 Datenblatt, <http://www.analog.com/>

3.3. Messungen im Labor

Um einen Überblick über das gesamte System zu bekommen sowie Zusammenhänge verschiedener Systemparameter richtig verstehen zu können, wurden unzählige Messungen im Labor durchgeführt. In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Ergebnisse aus dem Labor dokumentiert und analysiert.

3.3.1. Beeinflussungen des Systems durch Linsen

Wie schon in Abschnitt 2.1.4. festgestellt wurde, gibt es viele parasitäre Beeinflussungen, welche durch die Verwendung von Linsen auftreten können. Da sich qualitativ sehr hochwertige Linsen ob ihres hohen Preises für die aktuelle Version des Messgerätes ausschließen, wurden einige Standardlinsen mit verschiedenen Lichtquellen und mit dem Kamerasensor getestet.

Es wurde versucht mit einer sehr einfachen, kleinen und billigen Stablinse (dies ist eine Spezialform einer Sammellinse), die schon vorgestellte Laserdiode (RLD2WMFR1) auf den Kamerasensor und so gut als möglich auf einen schmalen Streifen zu fokussieren. In Abb. 78 ist das beste erzielte Ergebnis dokumentiert. Aufgrund von sphärischer Aberration ist es mit dieser sehr kleinen Linse nicht möglich, das emittierte Licht besser zu bündeln. Weiters fällt auf, dass sich entlang der vertikalen Achse im Bild durch die Lasermode und Beugungserscheinungen im Randbereich der Linse mehrere Maxima ausprägen, sowie außerdem das Problem besteht, dass die Beleuchtungsstärke entlang der horizontalen Achse, also genau in der Richtung in welcher die CCD Zeile platziert wäre, stark schwankt. Durch die breiten Abstrahl-Charakteristiken der Lichtquellen ist es notwendig größere Linsen zu verwenden, da dadurch die sphärische Aberration stark verringert werden kann. Außerdem sollten auch qualitativ hochwertige Linsen ausgewählt werden, welche weniger Linsenfehler durch Einschlüsse, Oberflächendefekte und Verunreinigungen verursachen. Werden Lichtquellen mit schmälere Abstrahl-Charakteristiken verwendet, können zwar kleinere Linsen benutzt werden, jedoch muss man dann mehrere optische Elemente einsetzen, um die Lichtstrahlen in einer Richtung auf die CCD Zeile zu fokussieren und in der anderen Richtung auf die gesamte Länge der CCD Zeile auszuweiten. Es wurde festgestellt, dass ab einer Halbwertsbreite von unter 100° eine Streulinse zur Strahlausweitung eingesetzt werden muss. Daher können die Linsen dann zwar kleiner werden, müssen jedoch wesentlich bessere Eigenschaften aufweisen.



Abb. 78 - RLD2WMFR1 mit einer Stablinse fokussiert

Mit einer anderen Stablinse konnte ein Ergebnis wie in Abb. 79 erzielt werden. Dabei wird sehr deutlich dass die Verwendung von Linsen, welche eine solche Beleuchtung des Sensors hervorrufen, sinnlos ist. Mit sehr günstige Linsen kann man daher vermutlich nicht die gewünschten Verbesserungen erzielen.

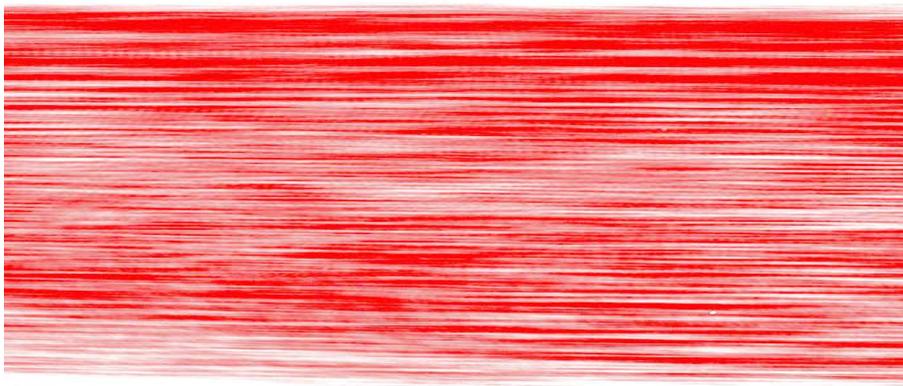


Abb. 79 - Unregelmäßige Beleuchtungsstärke

3.3.2. Speckle Noise eines Lasers auf einem CCD Sensor

Stellvertretend für viele Messungen ist in Abb. 80 die Belichtung des CCD Sensors (TSL1410) mit 8 Laserdioden angeführt. Zur Ansteuerung wurde hier derselbe Vorwiderstand für alle Belichtungen gewählt. Dieser ist nur knapp über dem Thresholdstrom der Laserdiode (ca. 27mA), für etwa 35-40mA, dimensioniert. Durch Bauteilstreuung, respektive der Durchlassspannung, stellen sich mit Verwendung desselben Vorwiderstandes bei den 8 Laserdioden verschiedene Ströme ein. Daher erkennt man bei den verschiedenen Beleuchtungsstärken, welche in direktem Zusammenhang mit dem Diodenstrom stehen, unterschiedlich stark ausgeprägtes Speckle Noise. Vergleicht man Laserdiode 2 welche vom geringsten Strom durchflossen wird, mit der Laserdiode 4 welche vom größten Strom durchflossen wurde, fällt sofort auf, dass durch die Erhöhung des Stromes das Speckle Noise stark zunimmt. Ein Betrieb der Laserdiode nur knapp oberhalb ihres Schwellstromes ist daher sicherlich wünschenswert, da das Speckle Noise dabei sehr gering bleibt. Mit entsprechenden Treiberbausteinen für Laserdioden kann dies gewährleistet werden.

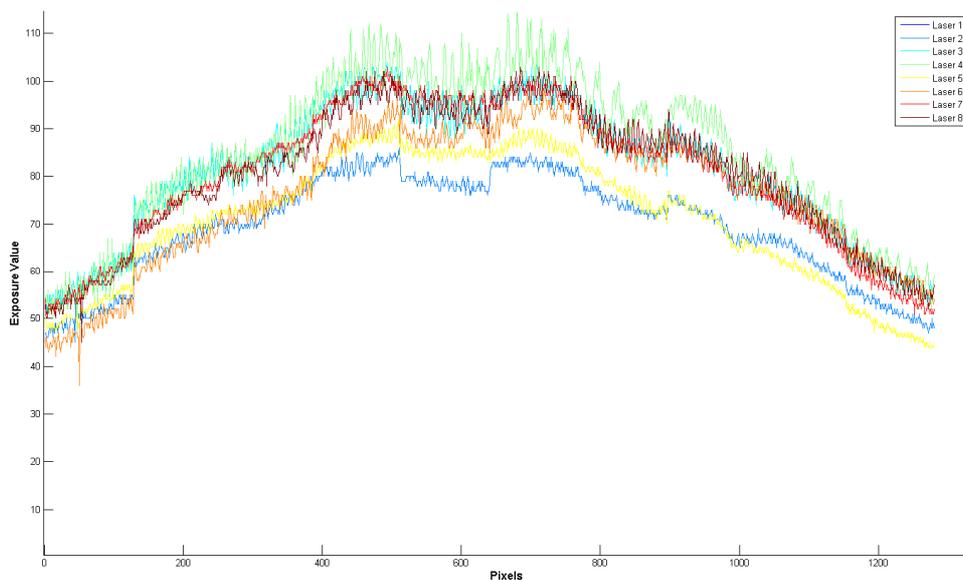


Abb. 80 - Belichtung eines CCD Sensors (TSL1410) mit einer Laserdiode (RLD2WMFR1)

Weiters fällt in Abb. 80 auf, dass es immer wieder Sprünge im Signal gibt, welche offensichtlich Segmentweise erfolgen. Dies ist auf eine Kombination von den Verstärkungen und Toleranzen in den zwei separaten Auslesezielen sowie dem internen Aufbau des Sensors zurückzuführen, da sich die Länge des CCD Sensors durch das aneinanderreihen mehrerer Halbleitersegmente ergibt. Jedes Segment für sich kann ein etwas anderes Verhalten bei derselben Beleuchtungsstärke in Bezug auf die Ausgangsspannung aufweisen.

Die benötigten Algorithmen zur Kantendetektion müssen daher nicht nur robust gegenüber Signalrauschen, bei Laserdioden größtenteils verursacht durch das angesprochene Speckle Noise, sondern auch gegenüber den segmentweisen Signalunterschieden der CCD Zeile sein.

3.3.3. Projektion einer Kante auf einen CCD Sensor (Laserlichtquelle)

Zwar wurde die Projektion einer Kante auf einen Kamerasensor schon in früheren Abschnitten betrachtet, dennoch führe ich hier kurz auch das Messergebnis bei einer Kantenprojektion auf den CCD Sensor an, da sich aufgrund der doch stark unterschiedlichen Pixelgrößen (TSL1410 / CCD: $63.5\mu\text{m}$ vs. Kamera / CMOS: $3.85\mu\text{m}$) die Messergebnisse der beiden Sensoren, wenn die Kante nahe am Sensor platziert wird, unterscheiden.

Ist die Kante nahe am Sensor, wird die Ortsfrequenz des Beugungsmusters höher. Durch die großen Pixel ergibt sich dabei das Problem des Aliasing. Das Beugungsmuster wird unterabgetastet, Informationen gehen vermeintlich verloren. In der nachfolgenden Abb. 81 ist eine aufgenommene Kantenprojektion auf den CCD Sensor in verschiedenen Abständen abgebildet, welche diesen Zusammenhang recht anschaulich darstellt. Da der Messbereich des Messgerätes recht kleine Kanten-Sensorabstände zulässt, ist es auf jeden Fall notwendig dieses Verhalten in den Algorithmen entsprechend zu berücksichtigen.

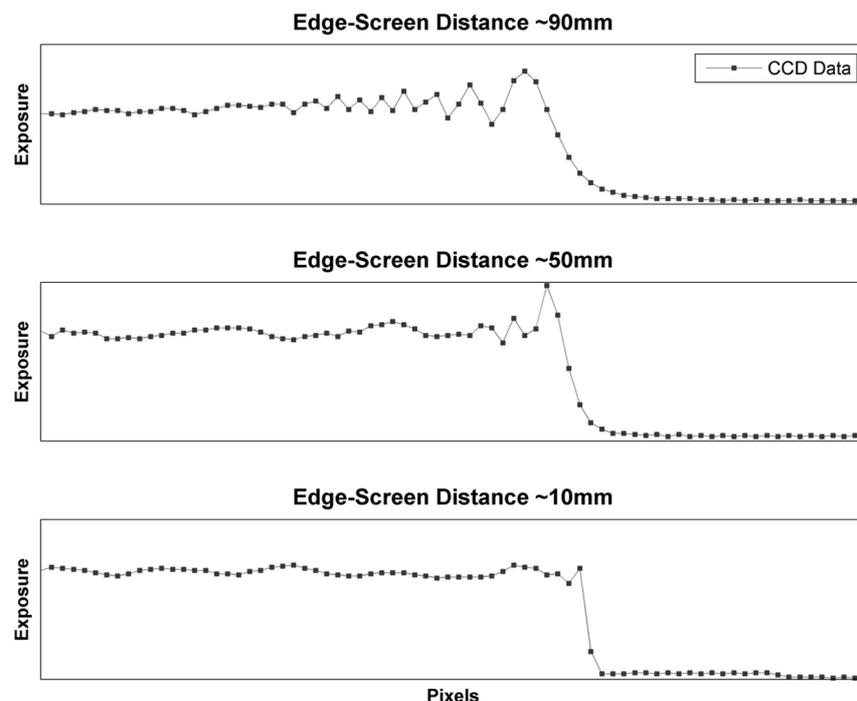


Abb. 81 - Belichtung des CCD Sensors (TSL1410) mit einer Laserdiode (RLD2WMFR1)

Noch anschaulicher wird dies, wenn man zwei Belichtungen für die beiden verfügbaren Sensoren, im selben Setup (identische Abstände der Kante und Verwendung derselben Lichtquellen) miteinander vergleicht. Dazu wurde der Abstand der Kante zum Sensor auf 10mm festgelegt und die Belichtungen beider Sensoren für diese Kantenposition ausgewertet (Abb. 83).

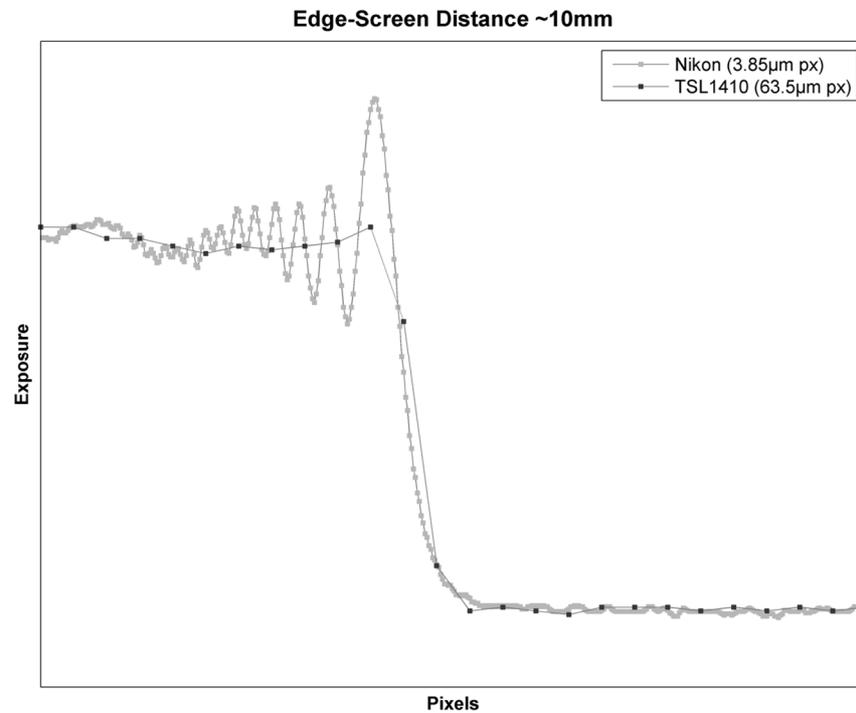


Abb. 82 - Vergleich von TSL1410 und Kamerasensor

Dabei erkennt man sehr gut das eigentliche Problem dass, obwohl das Beugungsmuster auf den Sensor projiziert wird, der schlechter auflösende Sensor (TSL1410) dieses nicht mehr erfassen kann. Aufgrund der Anforderungen an das Messgerät (Abschnitt 3.4.) kann dieser Sensor nicht durch einen besser auflösenden ersetzt werden. Daher ist es notwendig diesen Sensor zu verwenden. Im 4. Kapitel wird daher konkret auf mögliche Lösungsansätze für dieses Problem eingegangen.

3.3.4. Projektion einer Kante auf einen CCD Sensor (LED Lichtquelle)

Die Problematik des Aliasing besteht nicht nur bei der Kantenprojektion mit punktförmigen Lichtquellen, sondern kann auch bei der Verwendung von LEDs eine wichtige Rolle spielen. Da bei Verwendung des TSL1410, durch seine relativ geringe Ortsauflösung, auch bei einer LED, Informationen verloren gehen, wird dieses Verhalten in Abb. 83 veranschaulicht. Trotz der relativ großen Licht emittierenden Halbleiterfläche einer LED und der dadurch entstehenden breiten Kantenprojektion ist dieses Verhalten bei kleinen Kanten-Sensor Abständen gut erkennbar. Der Messaufbau wurde so ähnlich als möglich, wie zuvor in Abschnitt 3.3.3. realisiert, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten.

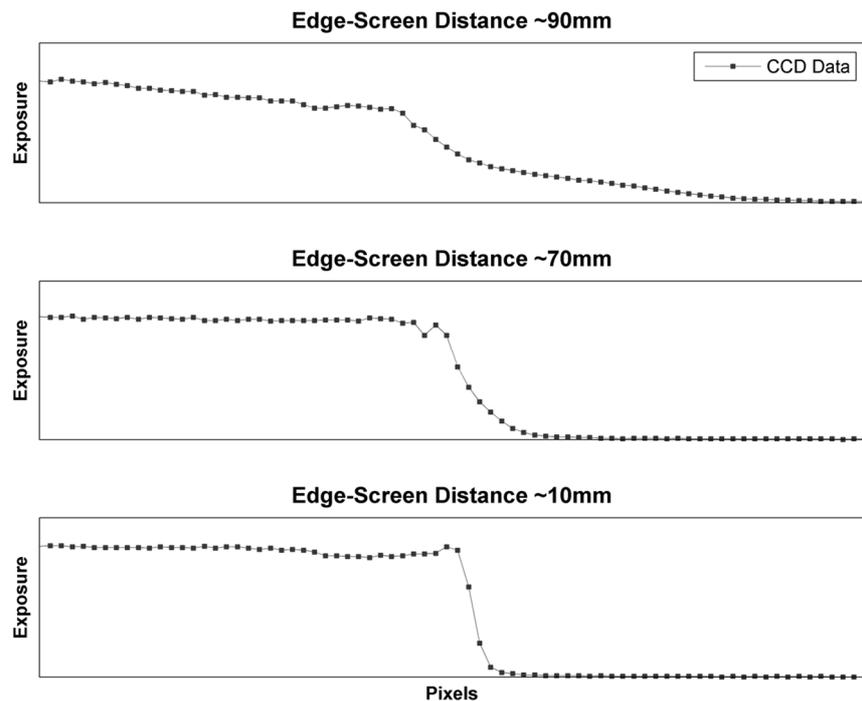


Abb. 83 - Belichtung des CCD Sensors (TSL1410) mit einer LED (SFH4255)

Dabei wird ersichtlich, dass die LED trotz ihrer nicht punktförmigen Lichtquellenform am Sensor keinen geometrischen Schattenwurf erzeugt, sondern sich schon ab einer Distanz von 70mm von der Kante zum Sensor recht deutlich ein Beugungsmuster ausprägt, welches durch Nebeneffekte (Streuung, Reflexion), wie sie bei dieser LED auftreten, stark beeinflusst wird. Daher ist bei 70mm Abstand auch nur der erste, am stärksten ausgeprägte Überschwinger des Beugungsmusters erkennbar. Bei 10mm Abstand von der Kante zum Sensor müsste das Beugungsmuster zwar um einiges besser erkennbar sein, jedoch tritt bei kleinen Abständen und der damit erhöhten Ortsfrequenz des Beugungsmusters wieder das Problem des Aliasing auf, welches verhindert, dass man dieses deutlicher erkennt.

Es lässt sich nun durch den Vergleich von LED- und Laserprojektionen erkennen, dass, je weiter man sich von der Lichtquelle entfernt, die Kantenprojektionen dieser beiden gänzlich unterschiedlichen Lichtquellen immer ähnlicher werden. Dies ist ein Indikator dafür, dass ein Modell verwendet werden könnte, welches als Grundlage jenes einer monochromatischen punktförmigen Lichtquelle besitzt und mit den Fresnel-Beugungsintegralen arbeitet. Im nächsten Kapitel wird darauf detaillierter eingegangen.

3.3.5. Belichtung des CCD Sensors (TSL1410) mit verschiedenen Lichtquellen

Abschließend möchte ich hier die aussichtsreichsten Kandidaten, welche als Lichtquelle für das System in Frage kommen, gegenüberstellen. Dabei wurde versucht, die Abstände von Lichtquelle zu Sensor im Messaufbau so ähnlich als möglich zu belassen (ca. 150mm). Die Ströme wurden so gewählt, dass diese am oberen Ende des für die Lichtquelle zulässigen Bereichs angesiedelt waren. Die Belichtungszeit wurde für alle Belichtungen am CCD Sensor mit 125µs gewählt.

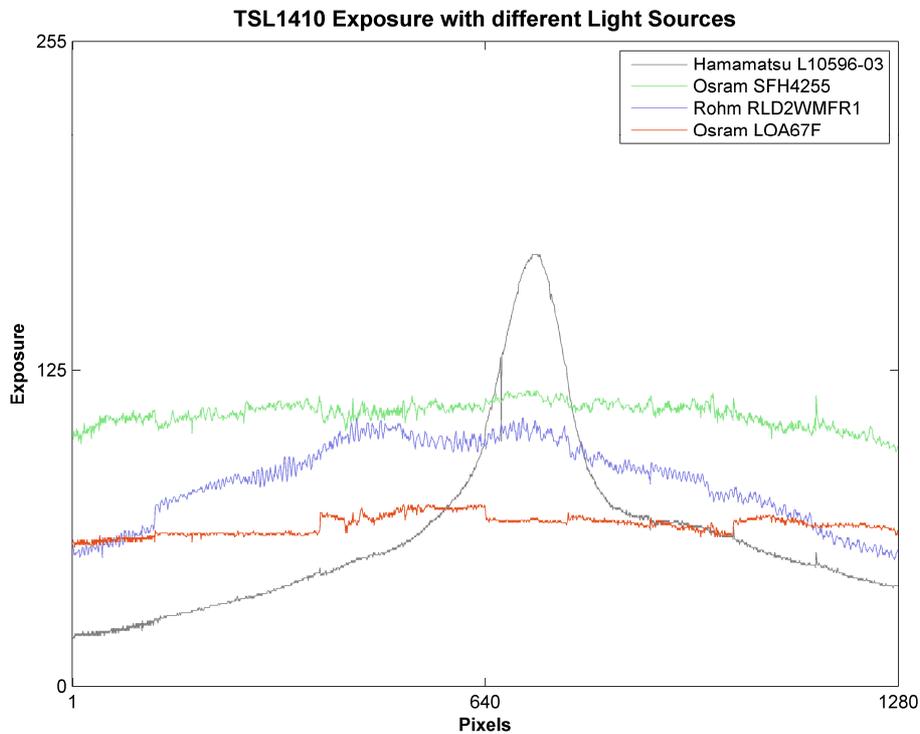


Abb. 84 - Belichtung des CCD Sensors (TSL1410) mit verschiedenen Lichtquellen

Man erkennt, dass mit keiner der verfügbaren Lichtquellen der volle 8-bit Dynamikbereich in dieser Testreihe ausgenutzt wird. Wie schon erwähnt, kann dies jedoch über die Anpassung der Verstärkungen der differentiellen OPVs geschehen und dadurch der gesamte Dynamikbereich des 8-bit ADUs genutzt werden. Da jedoch für alle Lichtquellen immer dieselbe Steuerelektronik (*CCD Interface*) verwendet werden musste, wurde die Verstärkung für alle Lichtquellen gleich belassen. Die Abbildung zeigt, dass mit den Osram LEDs eine nahezu konstante Ausleuchtung des 80mm breiten Sensors TSL1410 möglich ist.

3.4. Anforderungen und Verbesserungspotentiale

Im Rahmen dieser Arbeit werden nicht alle notwendigen Funktionen implementiert bzw. betrachtet, welche notwendig wären, um die an das Messgerät gestellten Anforderungen zu erfüllen, jedoch ist es von Vorteil diese zu kennen, um eventuelle Probleme frühzeitig zu erkennen und schon in der Designphase darauf reagieren zu können. Werden diese erst spät erkannt sind oft teure und auch langwierige Re-Design Schritte die Folge. Konzeptionelle Fehler sind noch schwerwiegender und daher noch schwieriger zu beheben und ziehen im schlimmsten Fall einen Projektabbruch nach sich.

Aus diesem Grund wurden viele Messungen mit den aktuell verfügbaren Systemkomponenten (Messaufbau mit dem TSL1410) durchgeführt, um auch aktuelle Probleme und Verbesserungspotentiale zu erkennen und die Zusammenhänge verschiedener Systemparameter richtig verstehen zu können. In erster Linie soll am Ende dieser Arbeit eine Aussage darüber getroffen werden können, ob eine Kantendetektion mit einer LED einerseits möglich ist und andererseits gleichzeitig die nachfolgenden Anforderungen erfüllt werden können, ohne aber das Gesamtsystemkonzept außer Acht zu lassen.

Funktionale Anforderungen

Durch die funktionalen Anforderungen entstehen die Randbedingungen, welche die Auswahl der Komponenten sowie den grundsätzlichen Aufbau des Gerätes festlegen.

Auflösung des Messgerätes	10 μ m
Genauigkeit (max. Abweichung X/Y Position)	+/- 50 μ m
Messgeschwindigkeit	Je nach Messmodus bis zu 1kS
Baugröße	nach Vorgabe (siehe Abb. 40)
Schnittstellen	Analoge Strom- (4-20mA) sowie Spannungs-Schnittstellen (0-10V), sowie eine weitere digitale Schnittstelle zur seriellen Positionsdatenübertragung (RS232)
HMI	Display mit Bedienfeld zum Ändern von Geräteeinstellungen
Messmodi	Einzelkantenerkennung, Doppelkantenerkennung, Dickenmessung sowie Durchmesser- und Rundheitsmessung für durchsichtige und undurchsichtige Objekte

Nichtfunktionale Anforderungen

Die wichtigste nichtfunktionale Anforderung ist die Reduktion der Kosten. Um eine solche gegenüber dem aktuell existierenden Gerät zu erreichen ist es notwendig, folgende Eigenschaften zu berücksichtigen:

- Aktuell verursacht das Messsystem durch die Kombination von mehreren Platinen, welche mit mehreren verschiedenen Steckverbindern und Verbindungsleitungen miteinander verbunden sind, in der Fertigung hohe Kosten. Durch eine geschickte Kombination dieser Einzelplatinen zu einer großen PCB, in welcher Lichtquellen, Interface und CCD Grabber Board auf einer einzigen Platine integriert sind, ist es nicht nur möglich die Kosten durch einen einfacheren Aufbau zu reduzieren, sondern auch

eine Ausdehnung, respektive Vergrößerung der Abstände von Systemkomponenten zueinander, durch erhöhte Umgebungstemperatur, welche sich im μm Bereich bewegen, zu berechnen und zu berücksichtigen.

- Weiters ist aktuell eine Laser-Linsenkombination im Einsatz, welche, aufgrund ihrer optischen Eigenschaften sowie der aufwändigen Fertigung und des schwierigen Einbaus in das Gerät hohe Kosten verursacht und daher ersetzt werden muss. Idealerweise können diese Laserlichtquellen durch LEDs ohne zusätzliche Optik ersetzt werden, welche direkt auf der neuen PCB mit allen anderen Systemkomponenten Platz finden können.

Verbesserungspotentiale des aktuellen Systems

Die nichtfunktionalen Anforderungen stellen gleichzeitig die Verbesserungspotentiale gegenüber dem aktuellen System dar. Zusätzlich dazu sollen die Algorithmen im Mikrocontroller verbessert werden, sodass eine genauere Kantendetektion ermöglicht wird.

Hinsichtlich der analogen Signalverarbeitungskette (inklusive Signalkonditionierung) besteht, ob der recht teuren eingesetzten Komponenten, auch großes Optimierungspotential.

Schon bei früheren Prototypen wurde bei den Anlogschnittstellen eine Beeinflussung während der Datenübertragung auf der RS232 Schnittstelle festgestellt. Auch dabei besteht Optimierungspotential, wenngleich in diesem Punkt nicht nur das PCB Layout, sondern eine Fülle an weiteren Aspekten wie Normen, Kabelaufbau, Leitungslänge uvm. berücksichtigt werden müssen.

4. Lösungsansätze und Implementierung

Wie schon im vorherigen Kapitel erwähnt wurde, ist das Ziel am Ende dieser Arbeit eine möglichst gute Aussage darüber treffen zu können, ob eine Detektion einer Kante mit einer LED und dem aktuellen CCD Sensor (TSL1410) in der gewünschten Genauigkeit möglich ist. Es wurden unzählige Messungen ausgewertet und analysiert, um die einflussreichsten Systemparameter ermitteln zu können. In diesem Kapitel wird die grundlegende Vorgehensweise zur Detektion von Kanten genauer betrachtet, sowie die dabei auftretenden Probleme beschrieben und Lösungsvorschläge dafür unterbreitet. Daher werden Messungen mit LED und Laserdiode als Lichtquelle verglichen um etwaige Zusammenhänge dieser beiden zu erkennen.

Wie sich herausstellte, bilden die mit der Laserdiode im Labor gewonnenen Erkenntnisse die Grundlage zur Entwicklung eines Modells für die LED. Ein Aufbau mit 8 Laserdioden als Lichtquellen, sowie eine Auswertung der daraus folgenden Messergebnisse hinsichtlich der erzielbaren Genauigkeit mit dem aktuellen CCD Sensor ist im Rahmen dieser Arbeit nicht geplant. Aufgrund der Anforderungen ist es notwendig die Systemkosten signifikant zu senken und genau dies ist durch die aufwändige Montage der Laserdiode nicht möglich.

4.1. Grundidee

Die grundlegende Idee ist recht einfach. Wenn man in der Lage ist, ein Modell des optischen Pfades zu finden, welches die in der Realität auftretenden Erscheinungen (Beugung, Brechung, Reflexion und viele weitere parasitäre Effekte) ausreichend genau beschreibt, so kann dieses verwendet werden, um anhand der Sensordaten, die Position der Kante einfach als Parameter des Modells zu berechnen. Denn nur eine bestimmte X/Y Position der Kante erzeugt die auf den Sensor abgebildete Kantenprojektion.

Die Hauptaufgabe bestand daher darin, die aufgenommenen Messdaten mit Simulationen zu vergleichen und die in den theoretischen Grundlagen erarbeiteten Erkenntnisse in die Modellbildung einfließen zu lassen.

Die Vermutung liegt nahe, dass das Modell des optischen Pfades mit einer Laserdiode als Lichtquelle, welche in Näherung monochromatisch und punktförmig ist, durch die Näherungslösung der Fresnelschen Beugungsintegrale recht gut beschrieben sein sollte. Da diese Lösung jedoch planar eintreffende Wellenfronten voraussetzt, und diese im Nahbereich des Lasers keinesfalls planar sind, muss damit gerechnet werden, dass das Modell noch weiter angepasst werden muss.

Das Modell für eine LED wird, wie schon in Abschnitt 3.3.4. festgestellt wurde, nicht mit einem rein geometrischen Ansatz zu beschreiben sein. Da auch bei der LED Beugungerscheinungen in den Sensordaten sichtbar wurden, muss auf jeden Fall beachtet werden, dass man eine LED für große Lichtquellen-Kanten und gleichzeitig kleinen Kanten-Sensor Abständen ähnlich einer punktförmigen Lichtquelle betrachten kann. Daher ist es sinnvoll, zuerst ein passendes Modell für die Laserdiode zu entwickeln und dieses in weiterer Folge für eine LED als Lichtquelle zu erweitern. Dieser Ansatz ist in Abschnitt 4.2.3. weitergeführt.

4.2. Algorithmen

Die zur Detektion der Kantenposition geschriebenen Algorithmen wurden aus zeitlichen Gründen ausschließlich in MatLab implementiert und evaluiert. Dabei lassen sich die Benötigten grob in folgende zwei Bereiche aufteilen:

- Algorithmen zur Kalibration: Ermittlung relevanter Systemparameter;
- Algorithmen zur Kantendetektion: Bestimmung der Position der projizierten Kante am Sensor zur Berechnung der Kantenposition;

Während es für die Kantendetektion notwendig ist, den Algorithmus in späterer Folge auch am Mikrocontrollersystem zu implementieren, wird die Kalibration nur in MatLab implementiert. Dabei werden aufwändig relevante Systemparameter ermittelt, welche zur späteren Kantendetektion im Speicher des Mikrocontrollers abgelegt werden. Da schon vor Beginn der Arbeit Kalibrieralgorithmen existierten, konnten diese teilweise verwendet und erweitert werden. Eine detaillierte Beschreibung des Ablaufs zur Ermittlung der Kalibrierdaten ist im Abschnitt 4.2.1. angeführt.

4.2.1. Kalibrierung des Systems

Bereits in den vorhergehenden Abschnitten wurde erwähnt, dass eine Kalibration des Systems notwendig ist. Aufgrund von Bauteiltoleranzen und Platzierungsunsicherheiten bei Bauteilen (Lichtquellen und CCD Sensor) sind zwar die ungefähren Positionen aufgrund der Montagepunkte bekannt (Abb. 85), jedoch variieren diese um die genannten Unsicherheiten.

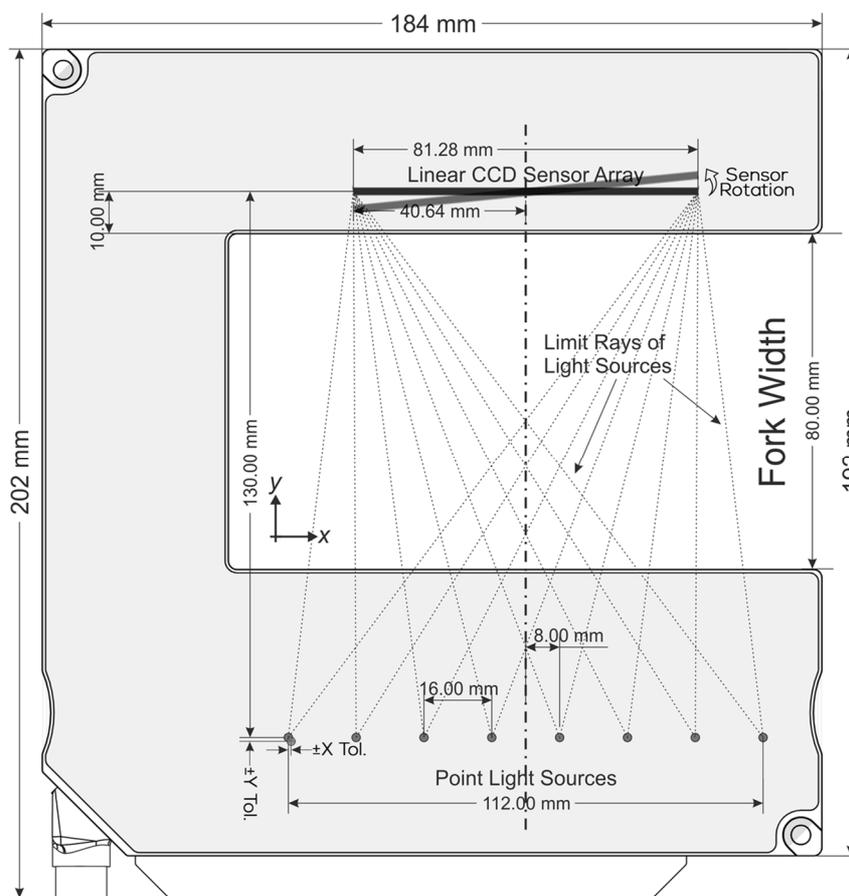


Abb. 85 - Fehler durch Unsicherheiten in der Bauteilmontage

Eine sog. Kalibrierung ist daher zur Feststellung der folgenden Systemparameter unumgänglich:

- Festlegung der X/Y Position des Sensors im Koordinatenursprung
- Schätzen der relativen Positionen der Lichtquellen zueinander und zum CCD Sensor (X/Y Position)
- Schätzen der Lage der CCD Sensorzeile (Verdrehung gegenüber der horizontalen Achse)

Wie schon in Abschnitt 3.2. erwähnt wurde, werden zur Kalibrierung die genauen relativen Kantenpositionen, welche durch die Bewegung der Kante mit dem Präzessionstisch bekannt sind, schon vorab gespeichert. Für die Kalibration sind daher folgende Daten zur Feststellung der systemrelevanten Parameter verfügbar, welche durch einen Optimierungsalgorithmus (*Least Mean Squares - Optimierung*) bestimmt werden:

- Relative Positionen (X/Y) der Kanten im X/Y Messfeld
- Ermittelte projizierte Kantenposition am CCD Sensor

Dadurch kann der, auch durch Unsicherheiten in der Bauteilepositionierung entstehende Fehler (hier in weiterer Folge *RMS-Residual-Error* genannt) minimiert werden. Dieser ist des Weiteren auch ein Qualitätsmaß für die Genauigkeit der bestimmten Position der projizierten Kante am Sensor, da für die Optimierung die projizierte Kantenposition so genau als möglich bekannt sein muss. Umso genauer diese ist, desto kleiner wird der RMS-Residual-Error. Im Idealfall treffen die von einer punktförmigen Lichtquelle ausgesendeten Strahlen, durch Verlängerung über die Kantenposition, direkt in die ermittelte projizierte Kantenposition am Sensor.

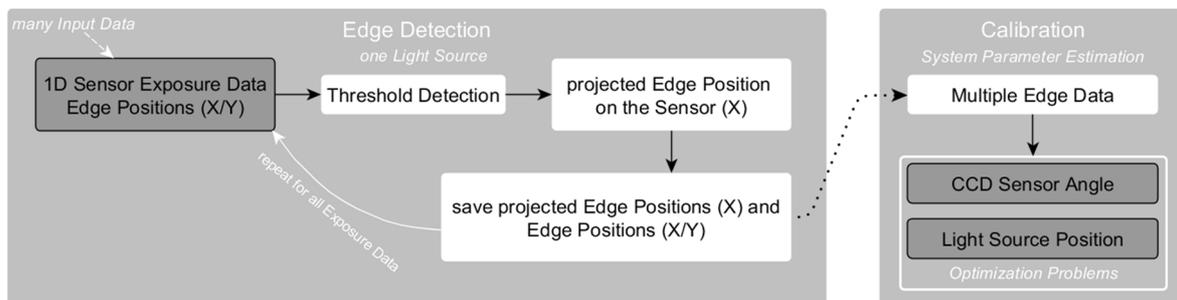


Abb. 86 - Prinzip der Ermittlung der Kalibrierdaten

Um die Qualität der Kantendetektion objektiv bewerten zu können erfolgt schon im Kalibrierprozess die Auswertung des RMS-Residual-Errors. Es wird dafür eine punktförmige Lichtquelle an einer festgelegten Startposition (x/y) angenommen, deren Strahlen über die bekannte Kantenposition im X/Y Messfeld verlängert werden und somit die Kante auf den Sensor projizieren. Die Summe aller Abweichungen von den, durch den Algorithmus detektierten und von der punktförmigen Lichtquelle projizierten Kanten am Sensor bildet den RMS-Residual-Error. Im Optimierungsalgorithmus wird dieser Fehler durch verändern der Lichtquellenposition sowie der Lage der CCD Sensorzeile minimiert. Dieser Algorithmus wurde nicht im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und wird daher auch nicht näher beschrieben.

Werden wie in Abb. 87 die Strahlen rückwärts projiziert, also von der durch den Algorithmus detektierten Kantenposition am Sensor zurück über die Kante zur Lichtquelle, ergibt sich eine

Schnittfläche der Projektionskanten an der Position der Lichtquelle. Je kleiner diese wird, desto eher schneiden sich die rückwärts projizierten Kanten in einem einzigen Punkt. Ist man in der Lage die Kanten exakt zu detektieren, wäre genau dies der Fall. Der RMS-Residual-Error würde dann gegen null gehen.

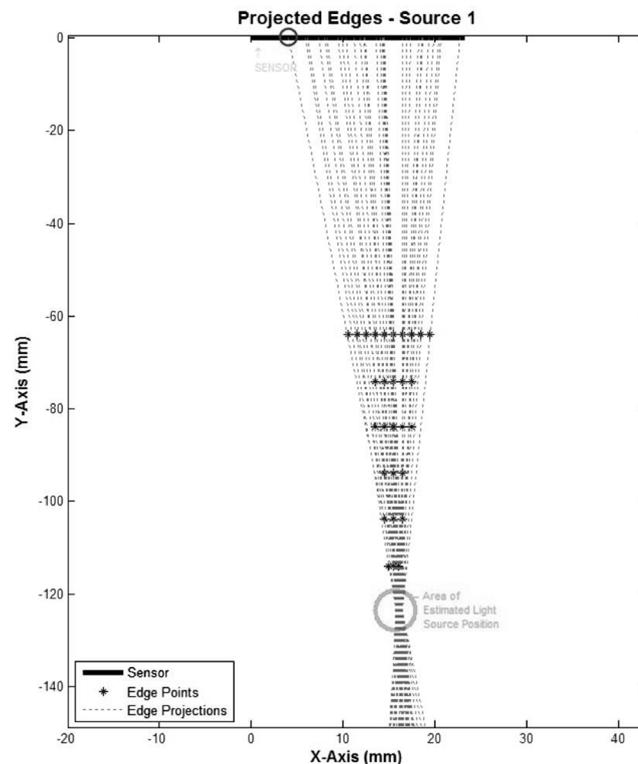


Abb. 87 - Startposition einer Lichtquelle und rückwärts Kantenprojektionen

4.2.2. Kantendetektion

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, durch schon vorhandenes Modellwissen die gesuchten Parameter rein mathematisch durch Lösen eines Optimierungsproblems zu bestimmen. Um jedoch gezielt Aussagen über den Einfluss verschiedenster systemrelevanter Parameter treffen zu können, wurde versucht, durch intuitive und iterative Lösung des Problems einen Algorithmus zu entwickeln, welcher auch zur Kalibration des Gerätes und zur Evaluierung des verwendeten Modells verwendet werden kann, da es auch dabei notwendig ist die projizierte Kantenposition am Sensor zu bestimmen.

Wie schon festgestellt wurde gibt der RMS-Residual-Error nicht nur eine Auskunft über die Genauigkeit der ermittelten Kalibrierdaten, sondern lässt gleichzeitig, wenn man statt einer einfachen Schwellwertdetektion schon vorhandenes Modellwissen verwendet, Rückschlüsse auf die Qualität des Modells zu. So muss beispielsweise ein gutes Modell einen kleineren Residual Error liefern als eine reine Schwellwertdetektion. Damit konnten Modellparameter verändert und ihre Auswirkung auf den Fehler beobachtet und dokumentiert werden, was wiederum Rückschlüsse auf den Einfluss der verschiedenen Parameter zulässt. In Abschnitt 4.3. sind einige Ergebnisse den RMS-Residual-Error betreffend, für verschiedene Lichtquellen und Modelle angeführt.

Folgendes Szenario bildet den Ausgangspunkt: Eine undurchsichtige und sehr dünne Kante wird in den Messbereich des Messgerätes bewegt und erzeugt dadurch die Kantenprojektion auf den CCD-

Zeilensensor. Die prinzipielle Vorgehensweise zur Detektion einer projizierten Kante ist recht einfach erklärt und wird durch die nachfolgende Grafik in Abb. 88 gut illustriert.

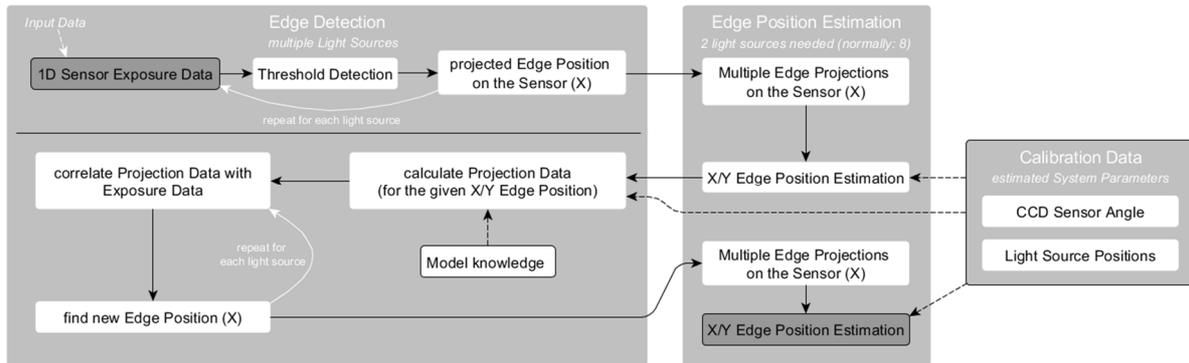


Abb. 88 - Prinzip der Kantenpositionsbestimmung im X/Y Messfeld

Die Messdaten der CCD-Zeile werden sequentiell für jeden Laser eingelesen und anschließend sofort, durch einfache Detektion eines Schwellwertes, eine erste Position der Kantenprojektion am Sensor berechnet.

Wurde dies für jede verfügbare Lichtquelle durchgeführt, so wird versucht mithilfe eines Optimierungsalgorithmus und den vorhandenen Kalibrierdaten, welche die Positionen der Lichtquellen und die Ausrichtung des CCD Sensors beinhalten, die aktuelle X/Y Position der Kante zu ermitteln. Natürlich ist diese erste Berechnung sehr ungenau, denn, wie schon festgestellt wurde, ist eine reine Detektion auf einen fix vorgegebenen Schwellwert nicht sehr robust gegenüber Störungen und kann auch nicht die benötigte Ortsauflösung erreichen.

Kennt man jedoch die ungefähre Position der Kante (dabei reicht eine Genauigkeit von mehreren Millimetern) kann man das vorhandene Modell verwenden um für jede der vorhandenen Lichtquellen die Projektion der Kante auf den Sensor zu berechnen. Dabei kann diese mit quasi beliebig hoher Genauigkeit, auch unter Berücksichtigung der im vorigen Abschnitt erwähnten integrierenden Charakteristik des Sensors, berechnet werden. Das heißt, obwohl der Sensor nur niedrig auflöst ($63,5\mu\text{m}$ Pixelabstand), besteht die Möglichkeit, die Kantenprojektion auf den Sensor in z.B.: $1\mu\text{m}$ Schritten zu berechnen.

Für die anschließende Korrelation der berechneten Kantenprojektion mit den Sensordaten bietet dies den Vorteil, dass dadurch Messgenauigkeiten, welche weit unter der Größe eines Pixels liegen, erreicht werden können, da damit eine Bestimmung der Kantenposition nicht nur auf ein halbes Pixel genau ($\pm 31,75\mu\text{m}$), sondern mit der zuvor festgelegten Genauigkeit der berechneten Kantenprojektion möglich ist. In unserem Beispiel wären dadurch theoretisch $\pm 0,5\mu\text{m}$ möglich. Durch diese ermittelten sehr genauen Projektionskanten am Sensor kann wiederum, mit den Kalibrierdaten und den vorhandenen Projektionskanten, eine X/Y Position der Kante geschätzt werden, welche dann innerhalb der geforderten Messgenauigkeit liegen sollte.

Die Vorgehensweise für die Berechnung der Kantenposition am Sensor sind für Laser und LED-Lichtquelle sehr ähnlich. Die Unterscheidung liegt nur in dem für die LED angepassten Laserlichtquellenmodell des optischen Pfades, welche jedoch die integrierende Charakteristik der Sensorpixel berücksichtigen.

4.2.3. Modelle des optischen Pfades

Zu Beginn der Arbeit waren noch keine Informationen bezüglich dem Modell für eine Lichtquelle vorhanden. Da bis dato im aktuellen Messsystem nur mit einfacher Schwellwertdetektion gearbeitet wurde, mussten diese beiden Modelle von Grund auf entwickelt werden. Es muss auch eine Aussage über die Qualität der Modelle getroffen werden, daher ist es notwendig, eine objektive Bewertung vorzunehmen, welche es ermöglicht verschiedene Modelle miteinander zu vergleichen. Dies wird im nächsten Abschnitt 4.3. genauer diskutiert. Auch für den Sensor ist es aufgrund der Pixelgröße notwendig ein passendes Modell zu entwickeln, um die Größe der Sensorpixel zu berücksichtigen.

4.2.3.1. Modell des Sensors

In Abschnitt 3.3.3. sind zwei Sensoren mit verschiedenen Pixelgrößen gegenübergestellt worden. Dabei wurde festgestellt, dass ein Sensor mit großen Pixeln, wie sie beispielsweise der TSL1410 besitzt, nicht über die notwendige Ortsauflösung verfügt um Beugungsmuster, welche durch kleine Kantensensorabstände erzeugt werden, zu erfassen. Da die Sensorpixel während einer Belichtung die auftreffenden Photonenpakete aufintegrieren, kann dies auch in den Modellen für den optischen Pfad realisiert werden. Durch Integration des Beugungsmusters über die Pixelgröße kann der wahre Belichtungswert, welcher am Ausgang des Sensors ausgegeben wird, ermittelt werden. Dazu wurden folgende Simulationen angestellt, wobei die aktive Pixelgröße mit $55,5\mu\text{m}$ (TSL1410) angenommen wurde. Berechnet man die Fresnel-Näherungslösung für eine dem Sensor sehr nahe Kantenposition ohne den integrierenden Ansatz, so zeigt sich, dass der Sensorausgang welcher die Belichtung eines Pixels repräsentiert, folgende relative Werte annehmen sollte:

Fresnel Diffraction Pattern without Integration over sensor pixels (px-size=0.05mm)

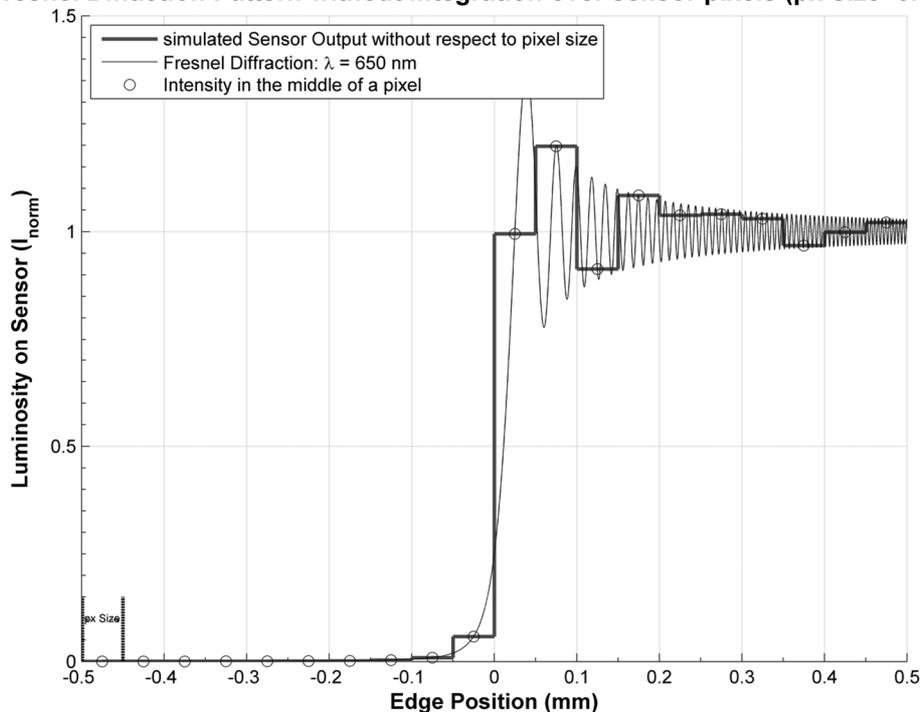


Abb. 89 - erwartete Sensorausgangsspannung ohne Berücksichtigung der integrierenden Charakteristik eines Sensorpixels

Berücksichtigt man auch die integrierende Charakteristik eines Pixels, so ergeben sich folgende erwartete relative Ausgangswerte des Sensors:

Fresnel Diffraction Pattern with Integration over sensor pixels (px-size=0.05mm)

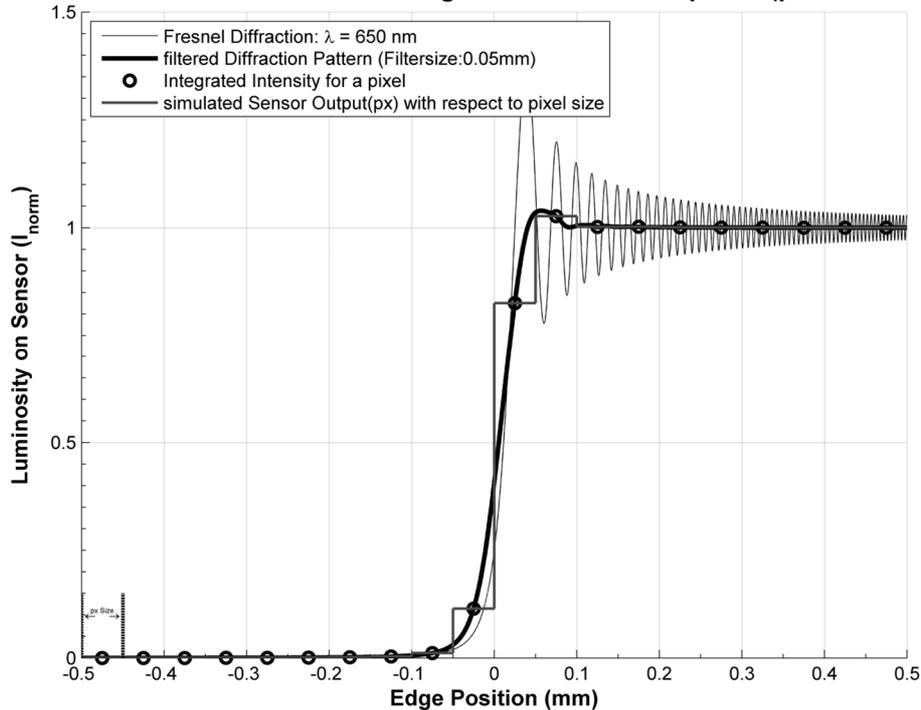


Abb. 90 - erwartete Sensorausgangsspannung mit Berücksichtigung der integrierenden Charakteristik eines Sensorpixels

Dies entspricht in guter Übereinstimmung den Beobachtungen aus Abschnitt 3.3.3. und sollte daher unbedingt in späterer Folge für die Kantendetektion berücksichtigt werden. Weiters lässt sich durch diese integrierende Charakteristik eine Verschiebung des Schwellwertes an der Kantenposition ($X=0\text{mm}$) von ursprünglich 25% der Intensität auf ca. 50% beobachten.

4.2.3.2. Modell für eine Laserlichtquelle

In Versuchen wurde festgestellt, dass die Fresnelschen Beugungsintegrale wie vermutet eine sehr gute Näherungslösung sind, sofern die Lichtquelle weit genug von der Kante entfernt ist, da dann die eintreffende Wellenfront in guter Näherung planar ist. Für viele Situationen, in denen sich eine Kante nahe der Lichtquelle befindet, wurde mithilfe von Messungen bestätigt, dass die einfache Näherungslösung für eine punktförmige monochrome Lichtquelle nicht ausreichend ist. Diese stimmt dann nur mehr schlecht mit den in der Realität beobachteten Beugungserscheinungen überein. Jedoch wurde festgestellt, dass es möglich ist, die bekannte Näherungslösung aus Abschnitt 2.2.2. um einen zusätzlichen multiplikativen Faktor ξ zu erweitern, sodass wieder eine sehr gute Übereinstimmung von Realität und angepasstem Modell erreicht werden kann.

$$I = \frac{I_0}{2} \left[\left(C(\zeta) + \frac{1}{2} \right)^2 + \left(S(\zeta) + \frac{1}{2} \right)^2 \right]$$

$$\zeta = \sqrt{\frac{k}{2z_0}} \cdot x, k = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \xi$$

Dieser zusätzliche Faktor steht in direktem Zusammenhang mit dem Abstand der Kante zum Sensor und konnte nach erfolgter Optimierung des Systems auch iterativ ermittelt werden. Dazu wurden zur Bestimmung dieses Parameters mehrere Kantenpositionen in verschiedenen Abständen zum Sensor aufgenommen und durch den Optimierungsalgorithmus nach einfacher Schwellwertdetektion die Systemparameter ermittelt (siehe Abb. 91).

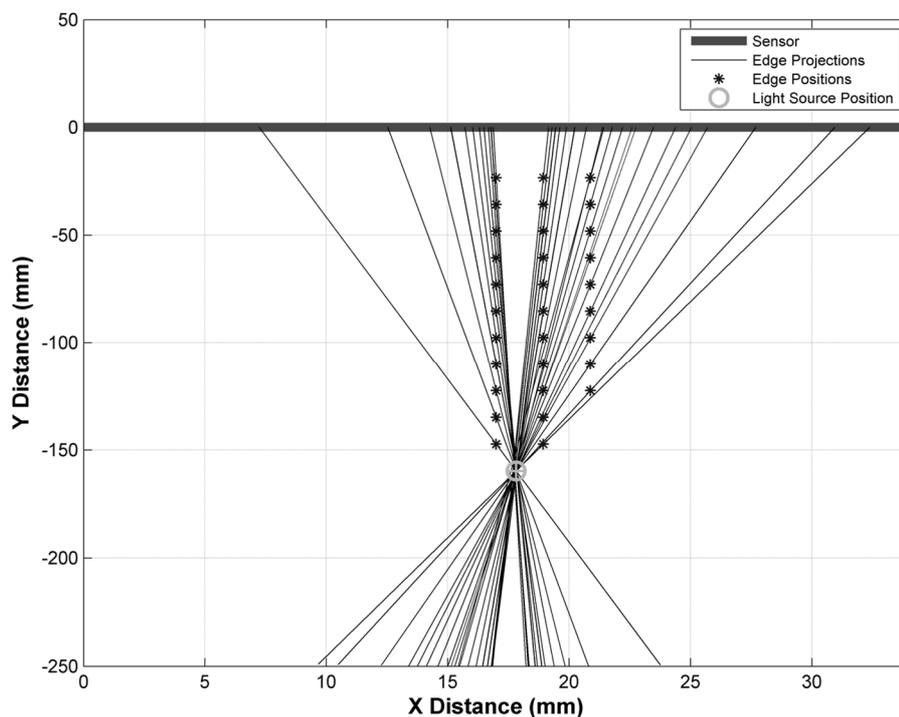


Abb. 91 - Kantendaten zur Bestimmung von ξ aus einem schon optimierten System

Da nun alle relevanten Systemparameter, sowie der Abstand der Kante von der Lichtquelle und vom Sensor bekannt sind, kann das Beugungsmuster am Sensor mithilfe der angepassten Näherungslösung für jede Kantenposition neu berechnet werden. Der neue Parameter ξ wird dabei für eine einzige Kantenposition in mehreren Schritten iterativ ermittelt, sodass das berechnete Beugungsmuster mit dem am Sensor aufgenommenen bestmöglich übereinstimmt. Dieser Vorgang wird für jede der in Abb. 91 gezeigten Kantenposition wiederholt. In Abb. 92 ist für einen Abstand von ca. 125mm ein in die Sensordaten eingepasstes Beugungsmuster abgebildet. Dabei wurde der Faktor ξ mit 0,31 ermittelt. Eine Auswertung des Parameters ξ in Abhängigkeit des Abstandes der Lichtquelle zur Kante ist in Abb. 93 dargestellt. Vorerst wurde dies nur für eine Laserdiode mit der Wellenlänge von 790nm durchgeführt.

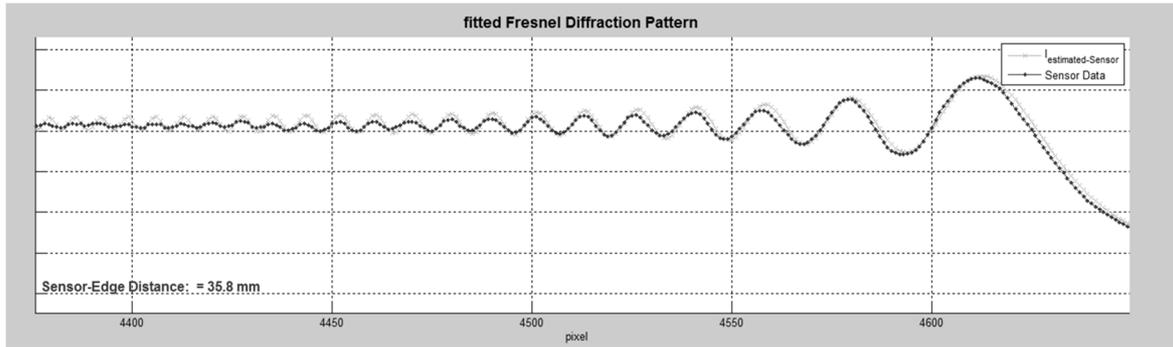


Abb. 92 - mittels Zusatzfaktor ξ eingepasstes Beugungsmuster

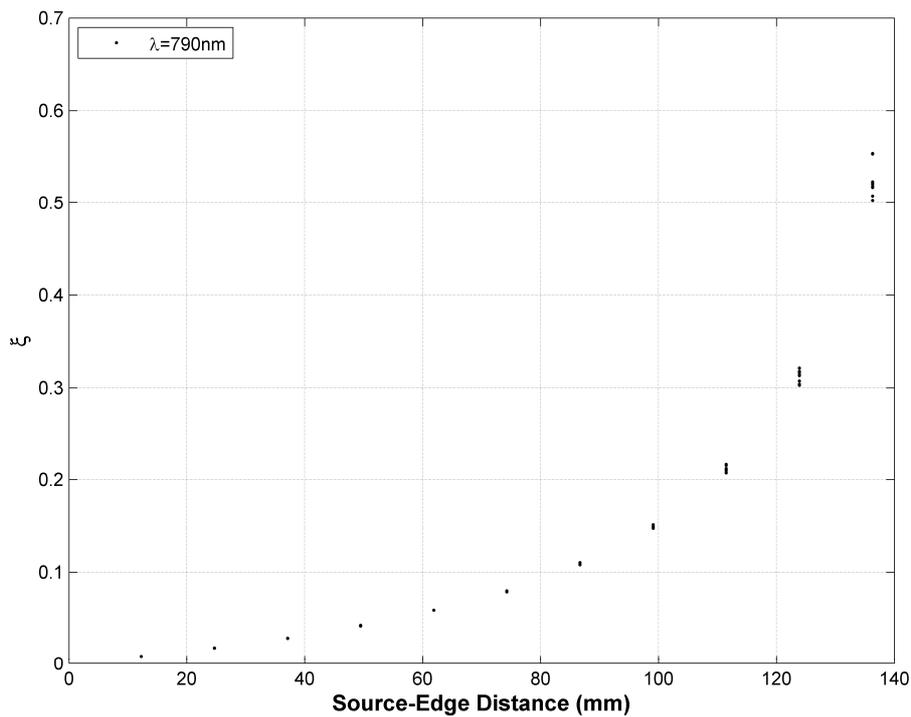


Abb. 93 - Parameter ξ in Abhängigkeit des Lichtquellen-Kantenabstandes

Die Interpretation ist dabei folgende: Befindet sich die Kante nahe der Lichtquelle, so ist es notwendig, das Modell stark anzupassen ($\xi \ll 1$). Je weiter sich die Kante von der Lichtquelle entfernt, desto eher sind die Wellenfronten planar und die Näherungslösung von Fresnel stimmt dann immer besser mit den Messdaten überein. Daher wird für große Abstände der Lichtquelle von der Kante $\xi = 1$ werden und kann dann vernachlässigt werden. Die Näherungslösung wird dann wieder ohne weitere Anpassung gute Ergebnisse liefern. Wichtig dabei ist es zu erkennen, dass es für die geplanten Lichtquellen-Kantenabstände (<150mm) jedenfalls notwendig sein wird das Modell anzupassen, sowie weitere Messungen vorzunehmen um eine Abhängigkeit des Parameters ξ nicht nur von der Y-Position der Kante sondern auch von der X-Position zu untersuchen.

4.2.3.3. Modell für eine LED Lichtquelle

Die aktuell beste Lösung für die Osram LED (SFH4255) erzielte ein erweitertes LED Modell, welches eine Kombination aus dem erweiterten geometrischen und dem erweiterten Modell einer punktlichtförmigen Lichtquelle bildet. Daher möchte ich den erweiterten geometrischen Ansatz nochmals kurz genauer erläutern.

Schon in Abschnitt 3.2.2.1. ist bei den Messungen im Labor aufgefallen, dass man nicht nur den geometrischen Schattenwurf von einer Lichtquelle auf den Sensor beobachten kann, sondern dass durch Reflexion am LED Gehäuse sich einige Nebeneffekte ergeben. Daher wurde zuerst das geometrische Modell um eine sekundäre größere Lichtquelle in derselben Ebene, welche die weiße Rückwand der LED modelliert, erweitert. Superposition der beiden geometrischen Kantenprojektionen führt zu den in Abb. 94 gezeigten Ergebnissen. Dabei wurde angenommen, dass primäre sowie sekundäre Lichtquelle den Sensor konstant mit derselben Beleuchtungsstärke beleuchten.

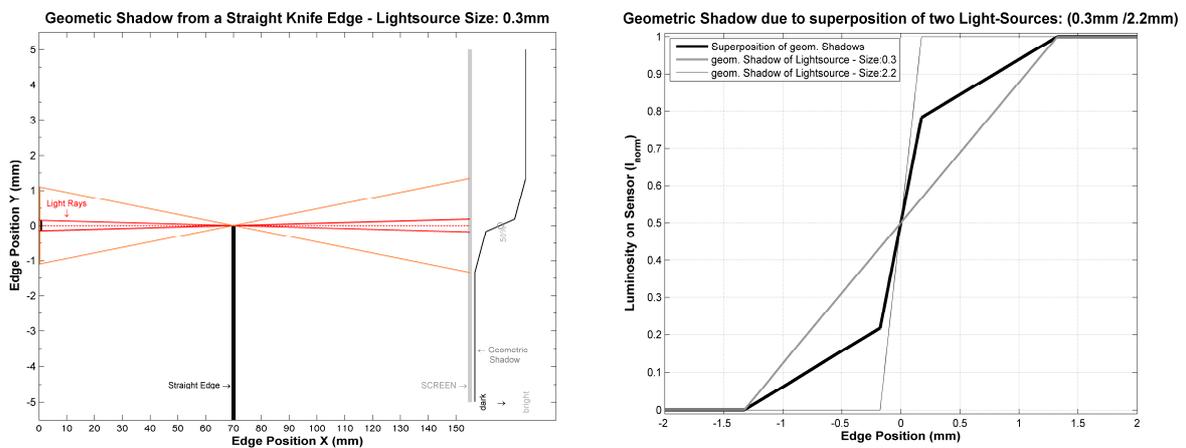


Abb. 94 - Simulation des erweiterten geometrischen Modells und Auswertung des simulierten Beleuchtungsprofils am Sensor

Im nächsten Schritt wurde versucht folgende Überlegung in das Modell einfließen zu lassen: Wenn man in Betracht zieht, dass die 0,3x0,3mm große Lichtquelle in Wirklichkeit als Vielzahl von punktförmigen Lichtquellen nebeneinander modelliert werden könnte, so entspricht dies eigentlich nur einer Überlagerung der, von verschiedenen punktförmigen Lichtquellen erzeugten, Beugungsmuster nebeneinander am Sensor, was wiederum einer einfachen Faltung mit einem Rechteck Filterkern entspricht. Die Größe des Filterkerns wird also durch die Breite des geometrischen Schattens am Sensor festgelegt. Die Idee an sich stammt ursprünglich aus der Astronomie, denn auch wenn sich Sterne sehr weit weg befinden, können diese für die Betrachtung von Beugungserscheinungen (z.B.: wenn sich der Mond vor einen Stern bewegt) zur Bestimmung der Entfernung nicht als punktförmig betrachtet werden [9]. Überlagert man nun die beiden berechneten Fresnelschen Beugungsmuster, welche mit den entsprechenden Faltungskernen gefiltert wurden, so erhält man das in Abb. 95 dargestellte vielversprechende Ergebnis. Vergleicht man dieses mit Abb. 83 auf Seite 79 so erkennt man sofort, dass dieses Ergebnis schon sehr stark dem entsprechen könnte, was in Realität auf den CCD Sensor projiziert wird.

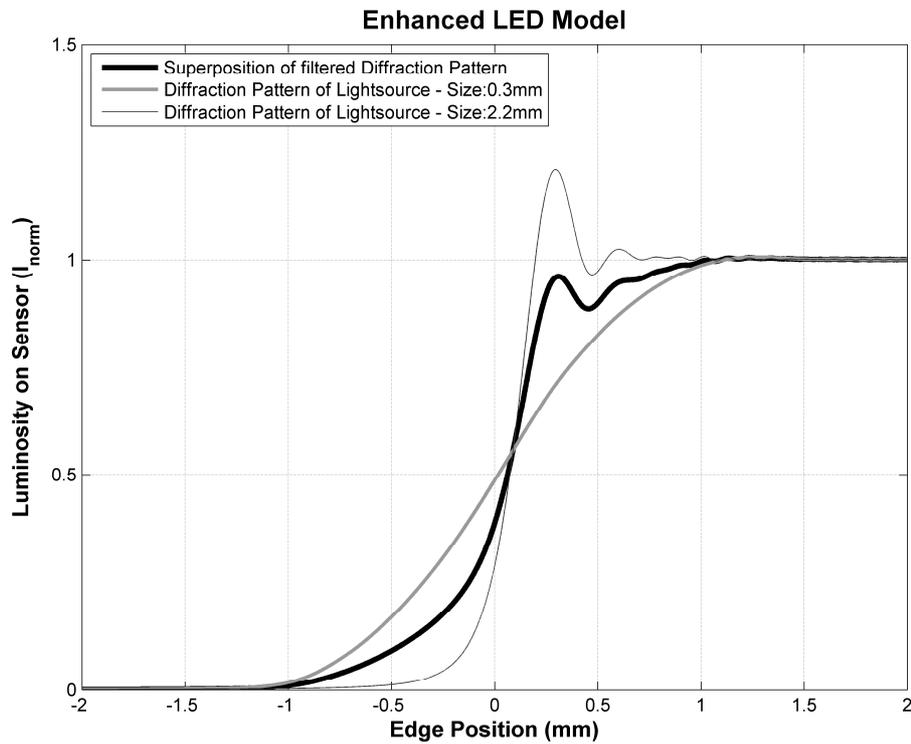


Abb. 95 - Simulation des Erweitertes LED Modells (SFH4255)

Um gute Ergebnisse für die Kantendetektion zu erhalten ist es aber noch notwendig, dieses Modell richtig zu parametrisieren (Größe und Intensität der primären und sekundären Lichtquelle), sowie zuerst auch noch ein passendes Modell für eine punktförmige Lichtquelle zu entwickeln, welches schlussendlich als Grundlage für das erweiterte LED Modell dient. Wie bereits analysiert wurde, ist die Näherungslösung für monochromatische punktförmige Lichtquellen in unserem Messfeld ohne weitere Anpassung leider nicht brauchbar und muss noch verbessert werden. Im nächsten Abschnitt wird diese berechnete Kantenprojektion (Abb. 95) auch kurz mit einer aufgenommenen Sensorbelichtung gegenübergestellt.

4.3. Ergebnisse

In diesem Abschnitt sind einige Ergebnisse und Unterschiede bei Verwendung verschiedener Modelle gegenübergestellt und dokumentiert. Wie schon beschrieben gibt der RMS-Residual-Error darüber Auskunft, mit welcher Genauigkeit die Position der Kantenprojektionen am Sensor bestimmt wurde. Daher ist dieser für die verschiedenen Messreihen als objektives Vergleichskriterium herangezogen worden.

4.3.1. Ergebnisse mit Laserdioden

Es werden mit zwei verschiedenen Laserdioden Messreihen aufgenommen und in späterer Folge ausgewertet. Große Unterschiede sind in den Ergebnissen, wie sie eine reine Schwellwert-detektion liefert, nicht zu erwarten, da sich das Beugungsmuster der Laserdioden nur aufgrund der verschiedenen Wellenlängen unterscheidet. Die einzige Unterscheidung ist aufgrund der Lasermode die Beleuchtungsstärke und das erzeugte Speckle Noise, was jedoch auf die Schwellwertdetektion nahezu keinen Einfluss hat.

Ergebnisse mit der Arima ADL65055TL

Zur Vergleichbarkeit der beiden Laserdioden wurde versucht für beide Laserdioden im selben Aufbau die Optimierung durchzuführen. In diesem Fall wurde die Laserdiode auch ohne zusätzliche Kollimatoroptik verwendet.

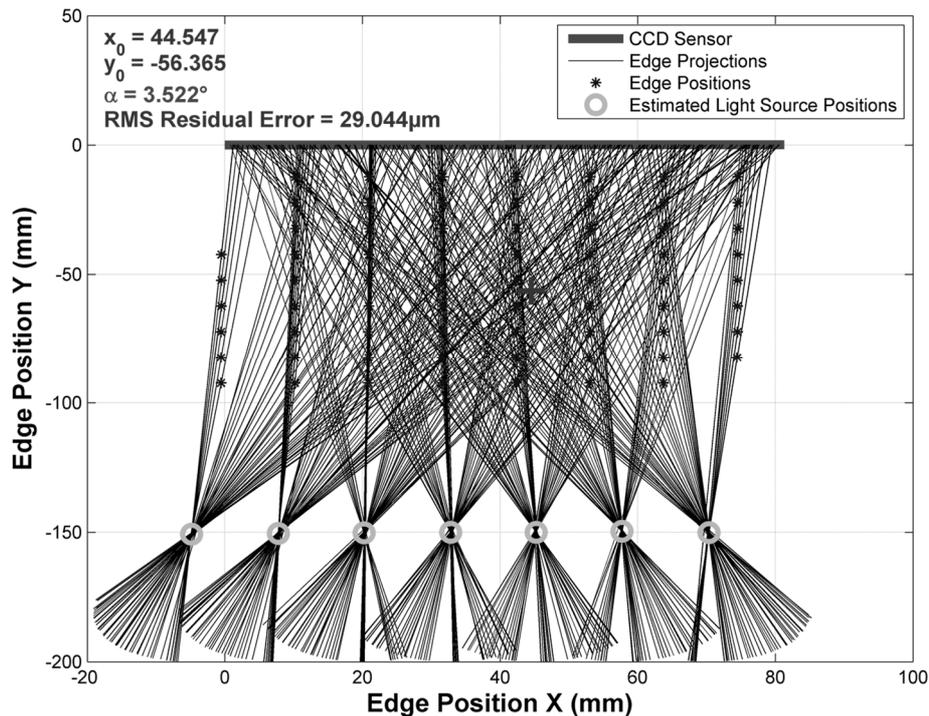


Abb. 96 - Ergebnisse mit Laserdiode und Schwellwertdetektion (ADL65055TL)

Wie anhand von Abb. 96 zu erkennen ist, bewegt sich der RMS-Residual-Error in der Größenordnung einer halben Pixelbreite, also innerhalb der, mit Schwellwertdetektion maximal erreichbaren Genauigkeit.

Ergebnisse mit der Rohm RLD2WMFR1

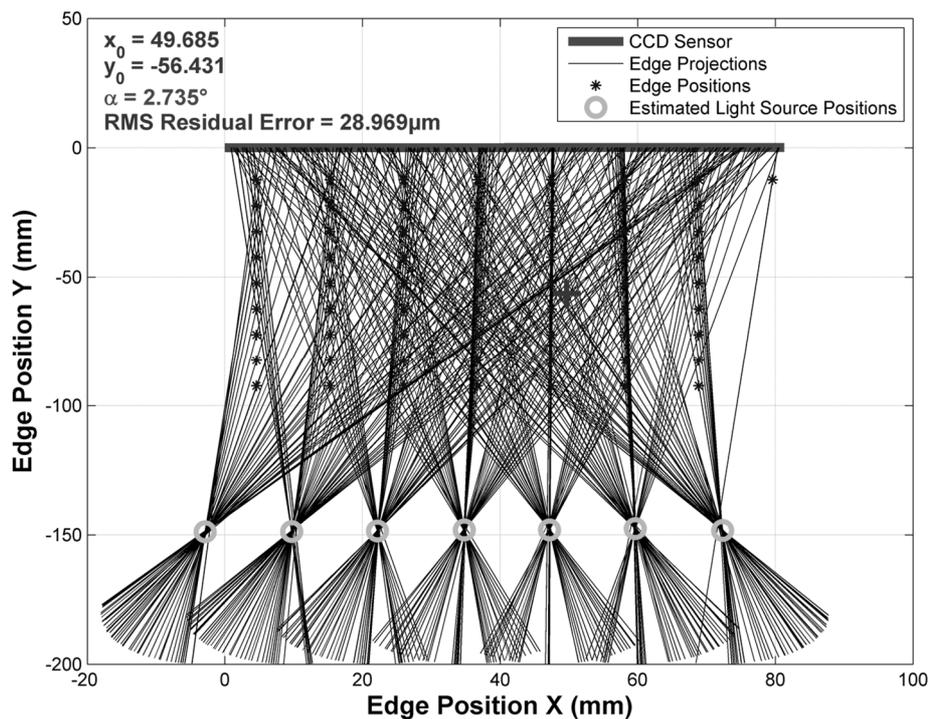


Abb. 97 - Ergebnisse mit Laserdiode und Schwellwertdetektion Rohm (RLD2WMFR1)

Wie schon bei der Arima Laserdiode im zuvor angeführten Messergebnis festgestellt wurde, bewegt sich auch bei dieser Laserdiode der RMS-Residual-Error im Bereich der maximal erzielbaren Genauigkeit. Da aber für den Feldeinsatz berücksichtigt werden muss, dass die Rohm Laserdiode wesentlich weniger Speckle Noise besitzt und auch eine bessere Beleuchtungsdynamik des Sensors erzielt, sollte dies für den Einsatz im Messsystem keinesfalls außer Acht gelassen werden. Ein größerer Signal-Rauschabstand erhöht die Störfestigkeit und daher in weiterer Folge auch die Genauigkeit des Systems.

Eine weitere Verbesserung in punkto Genauigkeit und SNR ist durch die Verwendung des angepassten Modells für eine punktlichtförmige Lichtquelle erzielbar. Dafür sind aber jedenfalls noch weitere Messungen notwendig um vergleichbare Ergebnisse vorlegen zu können, welche jedoch nicht mehr im Rahmen dieser Arbeit betrachtet wurden.

4.3.2. Ergebnisse mit einer LED

In diesem Abschnitt sind die erzielten Ergebnisse mit einigen LED Lichtquellen dokumentiert. Zunächst wurden einfache Schwellwertdetektionen durchgeführt und diese wieder anhand des RMS-Residual-Errors verglichen. Es ist zu erwarten, dass diese aufgrund der „breiten“ Kantenprojektion auf den Sensor bei Schwellwertdetektion deutlich schlechtere Ergebnisse als die zuvor erwähnten Laserdioden liefern.

Ergebnisse mit einfacher Schwellwertdetektion (Osram LSA67F)

In Abb. 98 ist das Ergebnis mit der Osram LSA67F LED dokumentiert. Diese ist der Osram SFH 4255 in nahezu allen Parametern sehr ähnlich. Der einzige Unterschied liegt in der Pulsbelastbarkeit und der abgestrahlten Wellenlänge.

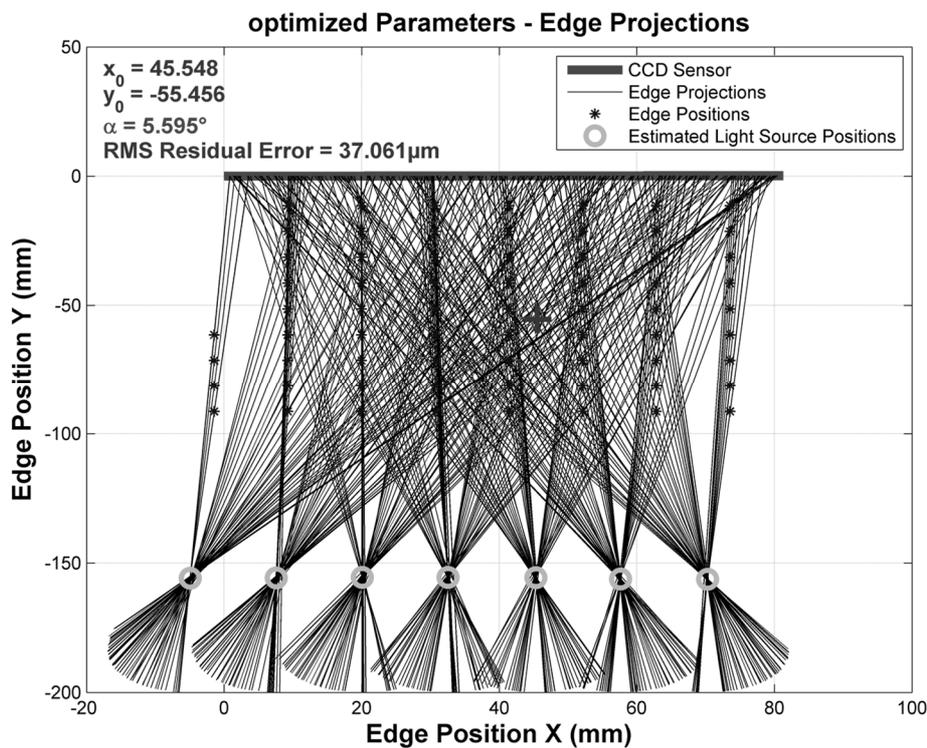


Abb. 98 - Ergebnisse mit LED und Schwellwertdetektion (Osram LSA67F)

Wie erwartet liegt der RMS-Residual-Error mit $37\mu\text{m}$ deutlich über den mit Schwellwertdetektion und den Halbleiterlaserdioden erreichten Werten.

Ergebnisse mit einfacher Schwellwertdetektion (Osram SFH4255)

Die Ergebnisse mit der Osram SFH4255 sind nachfolgend festgehalten. Wie erwartet liefert diese, aufgrund der gleichen Eigenschaften wie die zuvor erwähnte LED, auch einen ähnlichen RMS-Residual-Error.

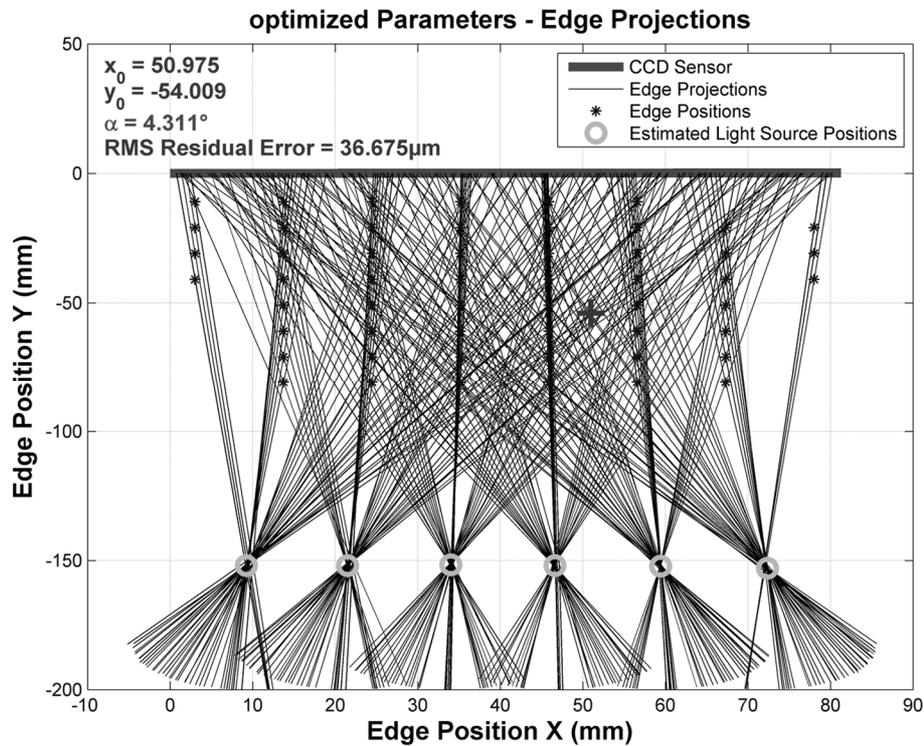


Abb. 99 - Ergebnisse mit LED und Schwellwertdetektion (Osram SFH4255)

Aufgrund dessen, dass das Sensorsignal mit Rauschen überlagert ist, kann schon alleine deswegen die Schwellwertdetektion mit einer LED nie bessere Ergebnisse wie bei derselben Methodik und der Verwendung einer Laserdiode liefern. Außerdem ist die reine Schwellwertdetektion bei der LED noch störanfälliger als bei der Laserdiode. Daher ist es anzuraten, das LED Modell passend durch die erwähnten Überlegungen zu erweitern um in späterer Folge dieses zur Kantendetektion einzusetzen.

Ergebnisse mit dem erweiterten LED Modell (Osram SFH4255)

Wie in Abschnitt 4.2.3.3. gezeigt wurde, kann ein erweitertes LED Modell gute Ergebnisse liefern. Dabei wird angenommen, dass sich die Belichtungen hervorgerufen durch zwei Lichtquellen, welche wiederum als Aneinanderreihung von punktförmigen Lichtquellen repräsentiert werden, am Sensor überlagern. In Abb. 100 wird das erweiterte LED Modell den Sensordaten des CCD Sensors für eine ausgewählte Kantenprojektion gegenübergestellt.

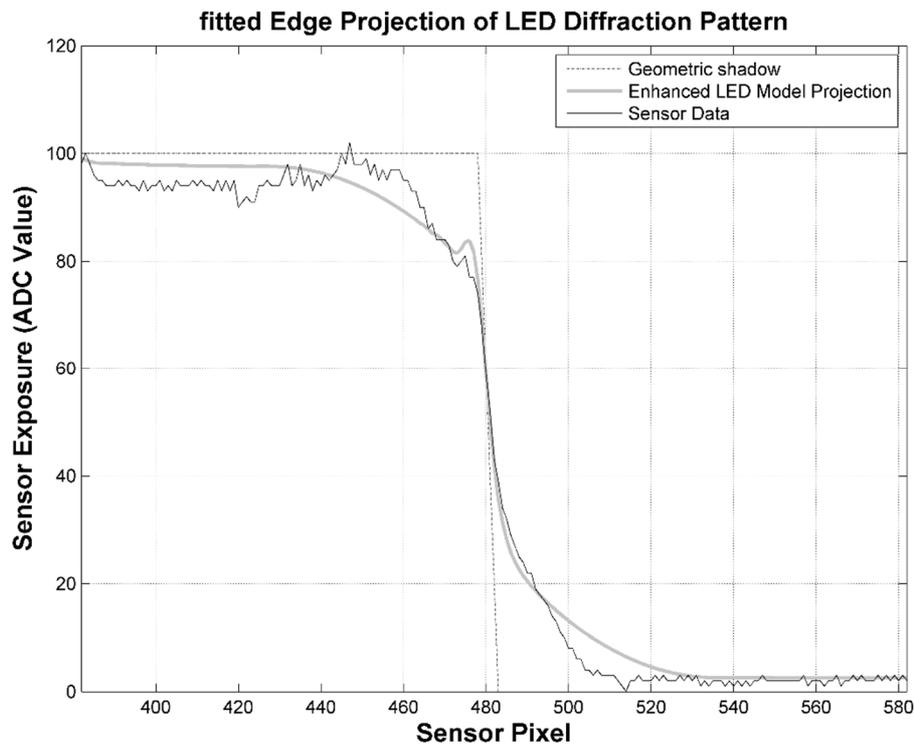


Abb. 100 - erweitertes LED Modell und Sensordaten bei Belichtung mit einer LED Lichtquelle (Osram SFH4255)

Das mit dem erweiterten Modell erreichte Ergebnis sollen die beiden nachfolgenden Abbildungen veranschaulichen. Dabei wurden zur besseren Vergleichbarkeit nur wenige Kanten ausgewählt, da dabei festgestellt wurde, dass das erweiterte Modell der LED besonders gute Ergebnisse liefert. Zuerst wurde daher wieder eine Schwellwertdetektion durchgeführt (Abb. 101) und danach das erweiterte Modell verwendet (Abb. 102). Da der erweiterte Algorithmus momentan in gewissen Situationen noch Probleme bei der zuverlässigen Detektion der Kanten zeigt, wurden bei der Verwendung des erweiterten LED Modells leider einige Kanten durch den Algorithmus verworfen. Der RMS-Residual-Error verringert sich durch Verwendung des Modells in diesem Beispiel um ca. 1/3 auf 21 μ m.

Prinzipiell soll diese Gegenüberstellung jedoch zeigen, dass es auch mit der LED möglich ist, gute Ergebnisse zu erzielen, obwohl sich die Kantenprojektion über viele Pixel hinweg erstreckt. Kann das Modell und die Algorithmen noch weiter verbessert werden, so darf vermutet werden, dass mit LEDs durchaus Ergebnisse ähnlich wie mit Laserdioden erzielt werden können.

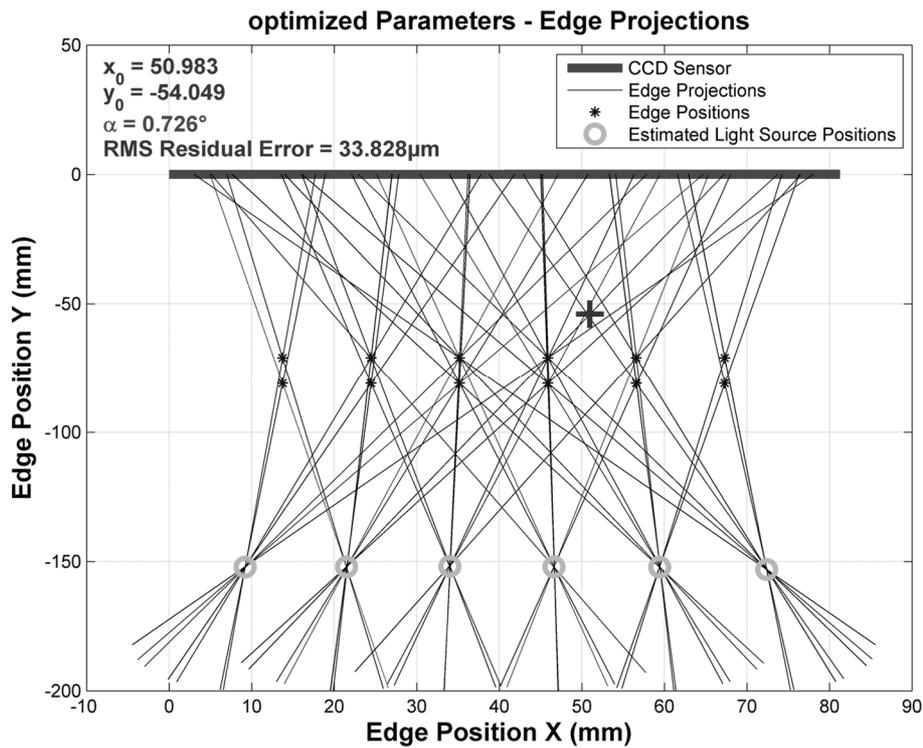


Abb. 101 - Ergebnisse mit LED und Schwellwertdetektion (Osram SFH4255)

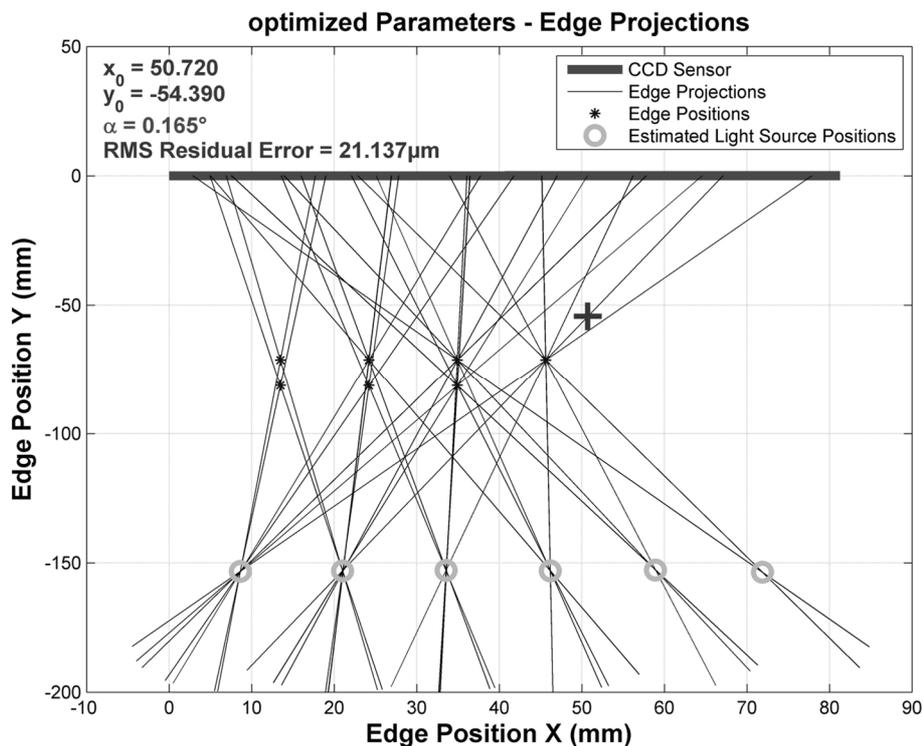


Abb. 102 - Ergebnisse mit LED und erweitertem LED Modell (Osram SFH4255)

Die erzielten Ergebnisse sind vielversprechend und sollten auf jeden Fall weiter verfolgt werden. Da das zugrunde liegende Modell einer punktlichtförmigen Lichtquelle verwendet werden muss, sollte dieses jedenfalls zuerst noch verbessert werden, um es in späterer Folge auch für das erweiterte LED Modell verwenden zu können.

5. Zusammenfassung und Ausblick

Im Laufe der Arbeit wurde festgestellt, dass es notwendig ist, Modelle des optischen Pfades und für den verwendeten lichtempfindlichen Detektor zu entwickeln, mit deren Hilfe es möglich ist, die erzeugten Projektionen am Sensor genauer zu beschreiben. Nur dadurch kann das aktuelle System, welches momentan mit Schwellwertdetektion arbeitet, in punkto Messgenauigkeit signifikant verbessert werden.

Genau darin liegen die momentan, teilweise noch ungelösten Probleme, Modelle zu finden, welche für alle möglichen Positionen einer Kante im X/Y Messfeld, nach Berechnung der Kanten Projektion auf den Sensor, eine gute Übereinstimmung mit den tatsächlichen Belichtungswerten liefern. Da für die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Probleme noch keine passenden Näherungs-lösungen existieren ist es zudem schwierig, vorhandene Ideen schnell in MatLab-Implementierungen umzuwandeln.

Trotzdem kann festgestellt werden, dass besonders das Modell für die LED Lichtquelle offensichtlich ein weiterer Schritt in die richtige Richtung gewesen ist, wenngleich es auch dabei noch notwendig ist, dieses weiter zu verbessern. Momentan wird von einer konstanten Leuchtstärkeverteilung direkt an der LED Lichtquelle ausgegangen um die Berechnung der Projektion zu vereinfachen. Speziell dies ist eine Annahme, welche nicht der Realität entspricht, da dabei eigentlich eine Lambert'sche Lichtstärkeverteilung berücksichtigt und in späterer Folge die Kantenprojektion nochmals genauer analysiert werden muss.

Zu Anfang der Arbeit wurde noch vermutet, dass es mit einfachen Linsensystemen möglich sein sollte gute Ergebnisse zu erzielen, da bereits in vorangegangenen Prototypen sehr einfache Linsen eingesetzt wurden. Da dabei jedoch immer mit Schwellwertdetektion gearbeitet wurde, konnten parasitäre Effekte der Linse vernachlässigt werden. Die in diesem Dokument angeführten Ergebnisse haben jedoch anschaulich gezeigt, dass mit billigen Optiken eigentlich keinerlei Verbesserung zu erwarten sein wird. Entsprechend gute Optiken mit hervorragenden Abbildungseigenschaften, wie sie in diesem Aufbau benötigt werden, sind teuer und werden von der Konkurrenz zum gleichen Einsatzzweck für mehrere hundert Euro verkauft. In [2] wird darauf hingewiesen, dass es Aufgabe des optischen Designers ist, abzuwägen welche Abbildungsfehler in Kauf genommen und wo durch geschickte Kombination von einfachen Linsen Fehler verringert werden können. Dabei erkennt man, dass es nicht möglich ist, eine pauschale Aussage darüber zu treffen, ob jede Kombination von Linsen eine Verbesserung erzielen wird, sondern dass man gegebenenfalls dafür einen Experten benötigt um die gewünschten Eigenschaften, wenn möglich auch noch kostengünstig, zu realisieren.

Auch in punkto analoger Signalverarbeitung und Signalkonditionierung besitzt das aktuelle System, wie in Abschnitt 3.2.3. festgestellt, Einsparungspotential. Ob Verstärkerschaltungen mit sehr teuren differentiellen OPVs überhaupt notwendig sind, sollte kritisch hinterfragt werden. Da dieser Teil schon am Mikrocontroller implementiert ist und weitestgehend auch ohne Probleme funktioniert, besteht dabei aus aktueller Sicht nicht die Notwendigkeit diesen zu ersetzen. Die größten Kosten werden in dem Messgerät durch die aufwändige Montage der Lichtquellen verursacht. Der Fokus sollte daher für die nächsten Entwicklungsschritte auf anderen Komponenten liegen, jedoch mit dem Wissen, dass auch im Analogteil für eine Serienfertigung noch einiges an Einsparungspotential vorhanden ist.

Dass es notwendig ist, das eingesetzte Mikrocontrollersystem anhand der gestellten Anforderungen auszuwählen wurde schon in Abschnitt 2.3.3. angemerkt. Die Abschätzung der benötigten Rechenleistung eines eingesetzten Mikrocontrollers oder DSPs kann jedoch erst zu einem späteren Zeitpunkt erfolgen, denn nur mit neuen Modellen und den dazugehörigen Algorithmen, kann eine Aussage über deren Komplexität getroffen und damit eine geeignete Architektur bestimmt werden. Dass dabei sogar, je nach Performanceansprüchen, auf Kombinationen von DSP, Mikrocontroller und/oder FPGA zurückgegriffen werden könnte, macht eine Auswahl der geeigneten Komponenten zum jetzigen Zeitpunkt daher keinesfalls möglich oder sinnvoll.

Aus Sicht der Elektromagnetischen Verträglichkeit von Geräten ist es notwendig, normative Anforderungen schon im Design zu berücksichtigen. So spielen verwendete Schnittstellen und deren Geschwindigkeiten, sowie die Schirmung dieser Leitungen eine große Rolle. Oft vernachlässigt und in den meisten Fällen verantwortlich für ein Nichtbestehen von diversen EMV Prüfungen ist das PCB Design, denn auch dabei muss sorgfältig gearbeitet werden um einerseits die HF Störaussendung so gering als möglich zu halten und andererseits unempfindlich gegenüber einkoppelnden HF Störungen zu sein. Re-Design Schritte sind immer sehr kosten- und zeitintensiv und sollten daher durch ein durchdachtes Konzept und gutes Design der PCB vermieden werden.

Abschließend möchte ich erwähnen, dass es aufgrund der Komplexität des Gesamtsystems überhaupt schwierig ist, ein solches in wenigen Iterationsschritten zu designen. Es benötigt fundiertes Wissen über optische Bauelemente, elektronische Schaltungstechnik, analoge und digitale Signalverarbeitung, sowie Kenntnisse in der Programmierung von Mikrocontrollern um ein solches Messgerät zu entwickeln. Während der Durchführung dieser Arbeit wurde festgestellt, dass ohne dieses Expertenwissen viele Erkenntnisse erst in Versuchen und Messungen gewonnen werden können, was wiederum einen langen Produktentwicklungszyklus zur Folge hat.

Die durchaus ambitionierten Ziele, am Ende dieser Arbeit ein nahezu serienreifes Messgerät entwickelt zu haben, waren im Nachhinein betrachtet sicherlich zu hoch gesteckt. Die Entwicklung von Projektionsmodellen ist mit großem Aufwand verbunden und muss, wie festgestellt wurde, jedenfalls noch weiter verfeinert werden. Dennoch konnten durch diese detaillierten Betrachtungen und zahlreichen Referenzmessungen viele Erkenntnisse gewonnen werden, welche in die aktuelle sowie auch zukünftige Entwicklung des Messgerätes einfließen.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 - Optische Messprinzipien.....	7
Abb. 2 - 300mm Dünnschicht Wafer ²	8
Abb. 3 - Grundlegendes Messprinzip	11
Abb. 4 - Geometrische Abbildung einer Kante bei Belichtung mit einer punktförmigen Lichtquelle ..	14
Abb. 5 - Bezeichnung von Wellenlängenbereichen im Elektromagnetischen Spektrum [1]	15
Abb. 6 - Lampenspektrum einer Natriumdampf-Hochdrucklampe (OSRAM) [2]	15
Abb. 7 - Verschiedene spektrale Wirkungsfunktionen [2]	16
Abb. 8 - Mögliche Flächenprojektionen (a) und Raumwinkel einer Kugelkappe (b) [2]	16
Abb. 9 - Spektrale Empfindlichkeit, Helligkeitsempfindungsfunktion [2]	17
Abb. 10 - Beziehungen beim photometrischen Grundgesetz [2]	17
Abb. 11 - Lichtstärkeverteilungskurven und ihre Darstellung in ausgewählten Ebenen [2]	18
Abb. 12 - Eigenschaften eines Lambertstrahlers [2]	18
Abb. 13 - Beleuchtungsstärkeberechnung unter einer punktförmigen Lichtquelle (a) und Beleuchtungsstärkevektor (b) [2]	19
Abb. 14 - LED - typische Baugröße	21
Abb. 15 - LED Abstrahlcharakteristik [2]	21
Abb. 16 - induzierte Emission [2]	22
Abb. 17 - Aufbau eines Lasers mit der Resonatorlänge L [2]	23
Abb. 18 - verschiedene Lasermoden [2].....	23
Abb. 19 - Radius der Taille (R_0), Radius in einem Abstand z (R), Divergenzwinkel δ [2]	23
Abb. 20 - Belichtung mit einer Laserdiode	24
Abb. 21 - Typische Ausbreitungscharakteristik einer Lichtquelle ohne und mit Linsenelementen (Kollimator Linsensystem) [12]	24
Abb. 22 - Fokussierung des Laserstrahls auf die Breite einer CCD Zeile [3]	24
Abb. 23 - Sphärische Aberration einer Sammellinse [3]	25
Abb. 24 - Koma einer sphärisch korrigierten Linse zeigt sich für schräg einfallende Strahlenbündel [2]	26
Abb. 25 - Grafische Darstellung der astigmatischen Bildschalen [2]	26
Abb. 26 - axialer Astigmatismus verursacht durch nichtideale Linseneigenschaften [2]	27
Abb. 27 - tonnenförmige (b) und Kissenförmige (C) Verzeichnung [2].....	27
Abb. 28 - Prinzip der Chromatischen Aberration [4].....	28
Abb. 29 - Definition der Reflexions-, Transmissions- und Absorptionsgrade [2]	29
Abb. 30 - Projektion einer Kante auf einen RGB Sensor (Bildausschnitt 6016x1 Pixel)	31
Abb. 31 - Ursprung von Kanten [5].....	31
Abb. 32 - Helligkeits- und Gradientenverlauf in einem Bild [5]	32
Abb. 33 - Geometrische Abbildung einer Kante bei Belichtung mit einer nicht punktförmigen Lichtquelle, 50mm Kantenabstand	33
Abb. 34 - Geometrische Abbildung einer Kante bei Belichtung mit einer nicht punktförmigen Lichtquelle, 20mm Kantenabstand	34
Abb. 35 - Huygens' Prinzip der Wellenausbreitung [6]	35
Abb. 36 - Doppelspalt Experiment [6]	36

Abb. 37 - Intensität nach einer beliebigen Apertur [13]	36
Abb. 38 - Beugung von Licht an einer Kante entlang einer Beobachtungslinie.....	38
Abb. 39 - Beugungsmuster einer Kante.....	39
Abb. 40 - Aktiver Messbereich	40
Abb. 41 - Messbereich bei Verwendung mehrerer Lichtquellen	41
Abb. 42 - Signal-Konditionierung und Verarbeitung	42
Abb. 43 - Pixelarray mit Mikrolinsen [2].....	43
Abb. 44 - Prinzip des Interline Transfers [2].....	44
Abb. 45 - Prinzip des Frame Transfer CCD's [2].....	45
Abb. 46 - Prinzip des Full Frame CCD [2].....	46
Abb. 47 - Prinzip der Frame Interline Transfer CCDs [2]	46
Abb. 48 - Prinzip eines CCD Zeilensensors [2]	47
Abb. 49 - Prinzip einer Passive Pixel Cell [2].....	47
Abb. 50 - Prinzip einer Active Pixel Cell [2]	48
Abb. 51 - Geometrischer Schattenwurf (Orts- und Wertdiskretisiert).....	53
Abb. 52 - Häufige Operationen in der digitalen Signalverarbeitung [7].....	55
Abb. 53 - Prozessor Architektur eines DSPs [8].....	56
Abb. 54 - Aufgaben der PC Software.....	58
Abb. 55 - Systemkomponenten.....	59
Abb. 56 - Aktuelles Messsystem.....	60
Abb. 57 - Straight Edge links und PlanarDL-200XY rechts.....	60
Abb. 58 - TSL1410 und Nikon D3200 Sensor	61
Abb. 59 - Spektrale Empfindlichkeit TSL1410 ²⁰	62
Abb. 60 - Hamamatsu L8957 – Bauteil	63
Abb. 61 - Hamamatsu L8957 - Lichtstärkeverteilung, Leuchtdichteverteilung und emittiertes Spektrum.....	64
Abb. 62 - Belichtung des Kamerasensors (Hamamatsu L8957).....	64
Abb. 63 - Hamamatsu L10596-03.....	65
Abb. 64 - Lichtstärkeverteilung und emittiertes Spektrum (Hamamatsu L10596-03).....	65
Abb. 65 - Belichtung des Kamerasensors (Hamamatsu L10596-03)	66
Abb. 66 - Osram SFH4255.....	67
Abb. 67 - Lichtstärkeverteilung, Leuchtdichte, emittiertes Spektrum und Pulsbelastbarkeit (Osram SFH4255).....	67
Abb. 68 - Belichtung des Kamerasensors (Osram SFH4255).....	68
Abb. 69 - Osram SFH4255 Belichtungsteilbereiche.....	68
Abb. 70 - Arima ADL65055 Pinout und Anschlussbelegung.....	69
Abb. 71 - Ausgangsleistung des Lasers (Temp.) und Strom der Monitordiode (P_{OUT}) ²⁵	70
Abb. 72 - Belichtung des Kamerasensors (Arima ADL65055TL)	70
Abb. 73 - Speckle Noise am CCD Sensor (ADL65055TL)	71
Abb. 74 - Rohm RLD2WMFR1.....	71
Abb. 75 - Spektrum einer herkömmlichen Laserdiode (links) und Rohm RLD2WMFR1 (rechts) ²⁶	72
Abb. 76 - Belichtung des Kamerasensors (Rohm RLD2WMFR1)	72
Abb. 77 - analoge Signalkonditionierung (Funktionsprinzip)	74

Abb. 78 - RLD2WMFR1 mit einer Stablinse fokussiert	75
Abb. 79 - Unregelmäßige Beleuchtungsstärke	76
Abb. 80 - Belichtung eines CCD Sensors (TSL1410) mit einer Laserdiode (RLD2WMFR1)	76
Abb. 81 - Belichtung des CCD Sensors (TSL1410) mit einer Laserdiode (RLD2WMFR1)	77
Abb. 82 - Vergleich von TSL1410 und Kamerasensor	78
Abb. 83 - Belichtung des CCD Sensors (TSL1410) mit einer LED (SFH4255)	79
Abb. 84 - Belichtung des CCD Sensors (TSL1410) mit verschiedenen Lichtquellen	80
Abb. 85 - Fehler durch Unsicherheiten in der Bauteilmontage	84
Abb. 86 - Prinzip der Ermittlung der Kalibrierdaten	85
Abb. 87 - Startposition einer Lichtquelle und rückwärts Kantenprojektionen	86
Abb. 88 - Prinzip der Kantenpositionsbestimmung im X/Y Messfeld	87
Abb. 89 - erwartete Sensorausgangsspannung ohne Berücksichtigung der integrierenden Charakteristik eines Sensorpixels	88
Abb. 90 - erwartete Sensorausgangsspannung mit Berücksichtigung der integrierenden Charakteristik eines Sensorpixels	89
Abb. 91 - Kantendaten zur Bestimmung von ξ aus einem schon optimierten System	90
Abb. 92 - mittels Zusatzfaktor ξ eingepasstes Beugungsmuster	91
Abb. 93 - Parameter ξ in Abhängigkeit des Lichtquellen-Kantenabstandes	91
Abb. 94 - Simulation des erweiterten geometrischen Modells und Auswertung des simulierten Beleuchtungsprofils am Sensor	92
Abb. 95 - Simulation des Erweitertes LED Modells (SFH4255)	93
Abb. 96 - Ergebnisse mit Laserdiode und Schwellwertdetektion (ADL65055TL)	94
Abb. 97 - Ergebnisse mit Laserdiode und Schwellwertdetektion Rohm (RLD2WMFR1)	95
Abb. 98 - Ergebnisse mit LED und Schwellwertdetektion (Osram LSA67F)	96
Abb. 99 - Ergebnisse mit LED und Schwellwertdetektion (Osram SFH4255)	97
Abb. 100 - erweitertes LED Modell und Sensordaten bei Belichtung mit einer LED Lichtquelle (Osram SFH4255)	98
Abb. 101 - Ergebnisse mit LED und Schwellwertdetektion (Osram SFH4255)	99
Abb. 102 - Ergebnisse mit LED und erweitertem LED Modell (Osram SFH4255)	99

Literaturverzeichnis

- [1] M. Csele, *Fundamentals of light sources and lasers*. John Wiley & Sons Inc., 2004.
- [2] N. Helmut, G. Schröder, and M. Löffler-Mang, *Handbuch Bauelemente der Optik*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2014.
- [3] J. Löbau, M. Lettenberger, G. Schedelbeck, and M. Sass, *Optische Abbildung*, 1998.
[Online]. Available:
<http://einrichtungen.ph.tum.de/E15b/lectures/mw/ps/v2.ps>.
- [4] R. Wimmer-Schweingruber, *Sammel- und Streulinsen, Vorlesungsfolien Universität Kiel*, 2005.
[Online]. Available:
http://www.ieap.uni-kiel.de/et/people/wimmer/teaching/Phys_II/P2_V11.pdf.
- [5] H. Bischof, *Computer Vision 1 & 2 Vorlesungsunterlagen - Technical University Graz*, 2012.
- [6] P. Khare and A. Swarup, *Engineering Physics: Fundamentals & Modern Applications*. Jones & Bartlett Pub, 2009.
- [7] N. Dahnoun, *Chapter1-DSP*, 2004.
[Online]. Available: <http://www.ti.com/ww/cn/uprogram/share/ppt/c6000/Chapter1.ppt>.
- [8] R. Oshana, *DSP Software Development Techniques for Embedded and Real-Time Systems*. Newnes, 2006.
- [9] M. Richmond, *Diffraction effects during a lunar occultation*, 2005.
[Online]. Available: <http://spiff.rit.edu/richmond/occult/bessel/bessel.html>.
- [10] R. Easton, *Optics of Imaging Systems Course Notes for 1051-733*, Rochester Institute of Technology, 2012.
- [11] *Wellenoptik - Vorlesungsfolien, Technische Universität Wien*.
[Online]. Available: https://www.univie.ac.at/physikwiki/images/0/07/Optik_Teil_3.pdf.
- [12] Schäfter+Kirchhoff GmbH, *Physics Fundamentals: Laser Diode Characteristics*, 2014.
[Online]. Available: <http://www.sukhamburg.com/download/fundamentals-laserdiodes.pdf>.
- [13] R. Wimmer-Schweingruber, *Beugungsintegral, Vorlesungsfolien Universität Kiel*, 2005.
[Online]. Available:
http://www.ieap.uni-kiel.de/et/people/wimmer/teaching/Phys_II/P2_V12.pdf.