



Diplomarbeit

Automatische Belichtungsregelung für Laserlichtschnitt

von **Jörg Futterlieb**

23. November 2011

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Preim,
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Dr. rer. nat. Thomas Dunker,
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung

Betreuer:

Dipl.-Ing. Jost Schnee,
Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Fakultät für Informatik
Universitätsplatz 2
39106 Magdeburg

Selbständigkeitserklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbständig und nur mit erlaubten Hilfsmitteln angefertigt habe.

Magdeburg, den 23. November 2011

Jörg Futterlieb

Zusammenfassung

Die vorliegende Diplomarbeit stellt ein Konzept zur automatischen Regelung der Belichtung bei der Messung mit Laserlichtschnittsensoren vor. Eine automatische Belichtungsregelung ermöglicht eine optimal abgebildete Profillinie. Diese ist nicht übersteuert, hat einen ausreichenden Kontrast und lässt sich von eventuell auftretenden Sekundärreflexionen abgrenzen.

In dieser Arbeit werden ein Verfahren zur Segmentierung der Laserlinie, zwei Methoden zur Bewertung der Qualität der Laserlinie und der Ablauf der bildbasierten Belichtungsregelung beschrieben.

Das Konzept wird an praktischen Beispielen erprobt und evaluiert. Die Evaluierung beinhaltet zudem den Vergleich der beiden Methoden zur Bewertung der Qualität der Laserlinie.

Abstract

This diploma thesis presents a concept of an automatic exposure control for laser light sectioning in optical 3D measurements. An automatic exposure control allows acquisition of an optimal image of the profile line. An optimal image is not overexposed, has an adequate contrast and the laser line can be separated from possible occurring secondary reflections.

The presented work describes a method for laser line segmentation, two methods for evaluation of the laser line quality and the procedure of the image-based exposure control.

The concept will be tested and evaluated on practical examples. The evaluation also contains a comparison of the two methods for evaluation of the laser line quality.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Zielstellung	2
1.3	Aufbau der Arbeit	2
1.4	Anmerkungen zur Arbeit	3
2	Voruntersuchungen	5
2.1	Belichtung	5
2.2	Versuchsaufbau	7
2.3	Laserlinien	8
2.4	Regelung	9
2.5	Belichtungszeit versus Laserintensität	11
2.6	Schlussfolgerungen für die weitere Entwicklung	11
3	Stand der Entwicklung	13
3.1	Belichtungsregelung der Kamera - Softwareansätze	13
3.2	Belichtungsregelung der Kamera - Hardwareansätze	17
3.3	Belichtungsregelung - Ansätze für Laserlichtschnitt	19
3.4	Segmentierung der Laserlinie	21
3.4.1	Modellbasierte Segmentierung mittels Snake	21
3.4.2	Modellgenerierung	21
3.5	Qualitätsbewertung der Laserlinie	23
3.5.1	Bestimmung des Auswertungsbereiches	23
3.5.2	Merkmal Helligkeitsdifferenz	25
3.5.3	Merkmal Verlaufsweite	25
3.5.4	Merkmal Kammbreite	25

3.5.5	Merkmal Homogenität	26
3.5.6	Bestimmung der Bildkennzahl	26
3.5.7	Bewertung	27
3.6	Peak Detection	27
3.7	Zusammenfassung	30
4	Konzept	31
4.1	Belichtungsregelung im Messprozess	31
4.2	Stufen der Belichtungsregelung	32
4.3	Histogramm	33
4.4	Segmentierung	34
4.5	Querschnitte der Laserlinie	37
4.6	Qualitätsbewertung der Laserlinie	39
4.6.1	Bewertung mit Kennzahlen	39
4.6.2	Bewertung mittels Gauß-Einpassung	40
4.7	Parametrisierung	42
4.8	Einsatz der Regelung im Messprozess	45
4.8.1	Einmalige Regelung vor der Messung	45
4.8.2	Regelung während des Messprozesses	46
4.9	Zusammenfassung	47
5	Implementierung	49
6	Evaluierung der Ergebnisse	53
6.1	Beurteilung der Regelungsstufen	53
6.1.1	Weiterentwicklung des Segmentierungsprozesses	53
6.1.2	Grenzen der Regelungsstufen	54
6.1.3	Parametrisierung der Qualitätsbewertungsverfahren der Laserlinie	55
6.2	Beurteilung der Belichtungsregelung	57
6.2.1	Evaluierungsstrategien	57
6.2.2	Ermittlung der optimalen Belichtungszeit	57
6.2.3	Laufzeitbetrachtung	60
6.2.4	Auswahl des Verfahrens zur Laserlinienbewertung	61
6.3	Zusammenfassung	61
7	Zusammenfassung und Ausblick	63
7.1	Zusammenfassung	63
7.2	Ausblick	64

1.1 Motivation

Lichtschnitt ist ein Verfahren zur kontaktlosen Vermessung von Objekten und wird bereits seit mehreren Jahren eingesetzt. Der Einsatz eines Lasers als Lichtquelle ermöglicht eine geringe Messunsicherheit im Mikrometerbereich. Dazu wird mittels einer Aufspreizoptik eine Laserlinie auf das Messobjekt projiziert und die Laserlinie von einer Kamera aufgenommen. Anhand der bekannten Position und Orientierung der Kamera zum Laser und der Position der Laserlinie im aufgenommenen Bild kann mittels Triangulation die Oberfläche rekonstruiert werden.

Ein Anwendungsgebiet dieser kontaktlosen Messmethode ist die Vermessung der Innenkontur einer Brillenfassung (Beispiel in Abbildung 1.1).

Abb. 1.1: Beispiel einer Brillenfassung für Tests des prototypischen Messsystems.



Die exakte Vermessung der Innenkontur der Brillenfassung ist notwendig, um die Brillengläser passgenau einsetzen zu können. Die Abmessungen der Brillenfassung sind oft aufgrund fehlender Konstruktionspläne nicht bekannt. Zudem besitzen, zunehmend in Billiglohnländern hergestellte, Brillenfassungen auch innerhalb einer Modellreihe eine Formvarianz. Bestehende, mechanische

Tastsysteme zur Konturvermessung können beim Messprozess empfindliche Brillenfassungen deformieren. Des Weiteren wird die Tastspitze des Messsystems abgenutzt. Daher ist ein kontaktloses Vermessungssystem wünschenswert.

Für eine erfolgreiche und genaue Vermessung des Objektes ist eine optimale Abbildung der Laserlinie erforderlich. Daher ist die Regelung der Belichtung eine wichtige Aufgabe im Messprozess.

1.2 Zielstellung

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, ein Verfahren zu entwickeln, das die Einstellung der Belichtungszeit/Laserintensität ermittelt, die eine optimale Abbildung der Laserlinie ermöglicht. Eine optimale Laserlinie ist nicht übersteuert und besitzt einen hohen Kontrast. Des Weiteren lässt sie sich von eventuell auftretenden Sekundärreflexionen abgrenzen.

Für die Regelung der geeigneten Belichtungszeit/Laserintensität wird ein zuverlässiger Algorithmus benötigt. Als Basis für die Regelung wird ein geeignetes Verfahren zur Qualitätsbewertung der Abbildung gesucht. Zudem soll die Regelung eine geringe Laufzeit haben, um eine schnelle Vermessung zu ermöglichen.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit folgenden Themen:

1. Recherche und Betrachtung von Verfahren zur Bewertung der Qualität von Profillinien von Laserlichtschnittsensoren.
2. Erstellung eines Konzepts zur Qualitätsbewertung der Laserlinie.
3. Weiterentwicklung des, in [Fut11] beschriebenen, Snake-basierten Segmentierungsverfahrens zur schnellen und automatischen Segmentierung der Laserlinie. Dies beinhaltet Geschwindigkeitsoptimierung und Verbesserung der Segmentierungsqualität.
4. Konzeption des Regelungsablaufs und Implementierung der automatischen Belichtungsregelung.
5. Praktische Erprobung und Evaluierung anhand von Belichtungsreihen. Die Belichtungsreihen beinhalten die Innenkontur von Brillenfassungen, Laufflächen von Eisenbahnradsätzen und Kugeln.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Diplomarbeit teilt sich im weitergehenden Teil in folgende Kapitel:

Kapitel 2 folgt im Anschluss und erläutert die Grundlagen/Rahmenbedingungen dieser Arbeit. Es werden der Versuchsaufbau vorgestellt und Besonderheiten beim Laserlichtschnitt analysiert.

Kapitel 3 betrachtet den aktuellen Stand der Technik im Umfeld des Gebietes dieser Arbeit. Dazu wird bestehende Literatur untersucht und bewertet.

Kapitel 4 entwickelt und beschreibt das Konzept für die automatische Belichtungsregelung.

Kapitel 5 beschäftigt sich mit der Umsetzung des Konzepts.

Kapitel 6 evaluiert die umgesetzten Verfahren und deren Ergebnisse.

Kapitel 7 beendet die Arbeit mit einer Zusammenfassung und bietet einen Ausblick auf weiterführende Aufgaben-/Fragestellungen.

1.4 Anmerkungen zur Arbeit

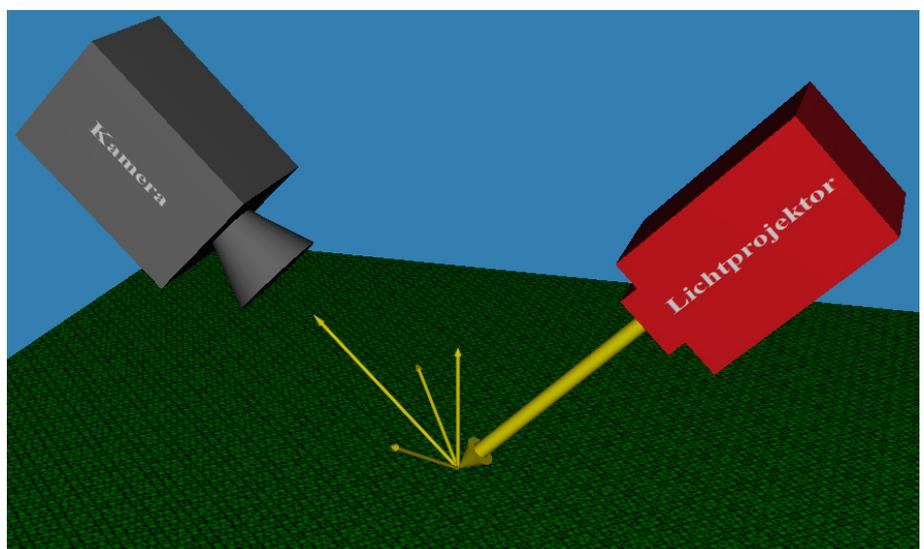
Diese Arbeit entstand am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung in Magdeburg. Die Thematik wurde in einem Zeitraum von 5 Monaten bearbeitet.

In diesem Kapitel werden die für diese Arbeit wichtigen Grundlagen/Rahmenbedingungen vorgestellt. Zunächst wird betrachtet, welche Parameter einen Einfluss auf die Belichtungsstärke haben und es werden kontrollierbare Parameter für die Belichtungsregelung abgeleitet. Danach wird als Einsatzziel der Versuchsaufbau vorgestellt. Im darauffolgenden Abschnitt werden verschiedene aufgabenspezifische Testbilder von Laserlinien und deren Problematiken dargelegt. Es erfolgt anschließend eine Betrachtung einer Regelung im Allgemeinen und die Abgrenzung zu einer Steuerung. Danach wird das Pro und Kontra bei einer Änderung der Belichtungszeit und/oder Laserintensität betrachtet. Abschließend werden weitere Schritte für die Entwicklung der Belichtungsregelung abgeleitet.

2.1 Belichtung

Belichtung bezeichnet in der Digitalphotographie das Sammeln von Licht mit Hilfe eines Sensors. Als Lichtquelle dient in dieser Arbeit ein Laserlichtgenerator, der Licht auf das zu vermessende Objekt wirft (siehe Abbildung 2.1).

Abb. 2.1: Schematische Darstellung eines optischen Messsystems. Die matte Oberfläche wird beleuchtet und der einfallende Lichtstrahl wird gestreut in mehrere Richtungen zurückgeworfen. Nur ein Teil der, vom Laserlichtgenerator erzeugten, Lichtmenge wird von der Kamera aufgenommen.



Die Menge der vom Sensor aufgesammelten Lichtenergie, und damit die Stärke der Belichtung, wird durch mehrere Faktoren beeinflusst.

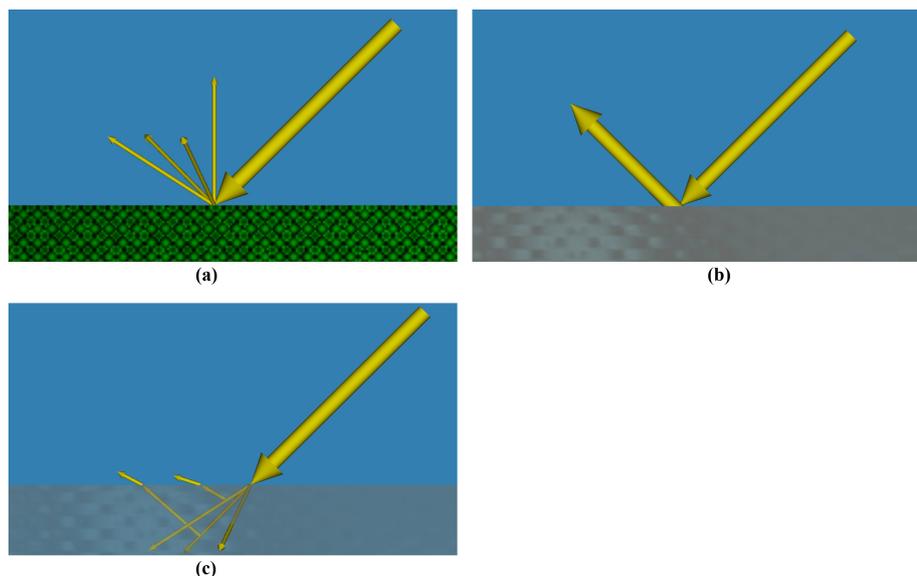
Zunächst sind zwei Einflussfaktoren die, von der Lichtquelle abgegebene, Lichtmenge und die räumliche Ausdehnung der Strahlen. Bei einem Laser werden annähernd parallele Lichtstrahlen erzeugt. Mittels Aufspreizoptik werden Laserstrahlen zu einer Laserlinie aufgeweitet. Dies führt zu einer Abschwächung der Beleuchtungsstärke mit zunehmender Distanz, jedoch ist die Abschwächung deutlich geringer als bei einer Punktlichtquelle (z. B. Glühbirne). Dort nimmt die Beleuchtungsstärke quadratisch zur Distanz ab.

Des Weiteren gibt es die kamera-spezifischen Einflüsse, diese sind:

1. Die Belichtungszeit legt die Dauer der Lichtenergieaufnahme fest und wird oftmals in Millisekunden gewählt.
2. Die Anzahl und Größe der einzelnen lichtempfindlichen Zellen (allgemein Mikrometerbereich) und der damit verbundenen Bildauflösung.
3. Der Durchmesser des Objektivs.
4. Eine (optional) vorhandene Blende.
5. Die Verschlusszeit bei einem (optional) vorhandenen Kameraverschluss.

Einen weiteren Einfluss hat die, von der Kamera aufgenommene, Objektoberfläche. Die Strahlungsstärke der, von der Oberfläche reflektierten, Strahlung ist abhängig von dem Winkel zwischen dem einfallenden Lichtstrahl und der Oberflächennormalen (ausgehend vom Lambertischen Gesetz [Ste08]). Daher wird die Stärke der Belichtung des Sensors durch die Oberflächenbeschaffenheit des Objektes und dessen Reflexionseigenschaften beeinflusst (Vergleich in Abbildung 2.2).

Abb. 2.2: Die schematische Abbildung zeigt in (a) die Beleuchtung einer rauen Oberfläche (z. B. Stoff). Der Lichtstrahl wird gestreut zurückgeworfen. In (b) wird der einfallende Lichtstrahl aufgrund einer glatten Oberfläche z. B. Metall) nicht gestreut zurückgeworfen. In (c) tritt der Lichtstrahl in ein transparentes Objekt ein. Ein Teil der Lichtmenge wird reflektiert und ein Teil durchwandert das Objekt.



Weitere Faktoren sind die Orientierung der Kamera zur Oberfläche und deren Abstand. Zudem können Verdeckungen auf der Objektoberfläche mit den damit verbundenen Schattenwürfen auftreten. Neben der dargestellten indirekten

Beleuchtung der Photozellen der Kamera (Abbildung 2.1) kann eine direkte Beleuchtung existieren, wenn die Lichtquelle sichtbar für die Kamera ist.

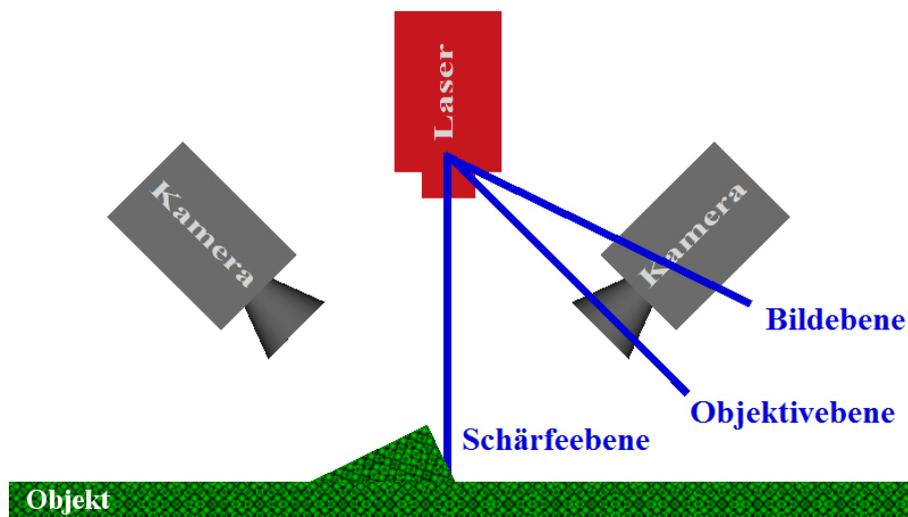
Zuletzt ist, neben den Kamera-, Laser- und Objekteigenschaften, das Übertragungsmedium ein Einflussfaktor auf die, vom Sensor aufgenommene, Lichtmenge.

2.2 Versuchsaufbau

Das zu entwickelnde Konzept soll für ein prototypisches Messsystem zur Vermessung der Innenkontur von Brillenfassungen umgesetzt werden. Das Messsystem besteht aus 2 Kameras und einem Laserlinienprojektor. Aufgrund der bekannten Lage von Laser und Kamera und der Bildaufnahme kann mittels Triangulation (siehe [KKS96]) die 3D-Oberfläche rekonstruiert werden.

Die Anordnung von Laser und Kamera basiert auf der Scheimpflug-Regel [Mer96] und ist schematisch in Abbildung 2.3 dargestellt. Die Scheimpflug-Regel besagt, wenn Bild-, Objektiv- und Schärfenebene sich in einer Geraden schneiden, so werden die Objektpunkte in der Schärfenebene mit maximaler Schärfe auf die Bildebene abgebildet. Bei dem prototypischen Messsystem entspricht die Schärfenebene der Laserebene. Üblicherweise sind in einer Kamera die Bildebene und Objektivenebene parallel, daher wurde die Lage der Bildfläche entsprechend angepasst.

Abb. 2.3: Schematische Darstellung des Messsystems mit der Verwendung der Scheimpflug-Regel. Ein Laserlinienprojektor wirft eine Lichtlinie auf ein Objekt, welches von zwei Kameras aufgenommen wird. Es werden 3 Ebenen durch das Kameraobjektiv, die Bildfläche mit den lichtempfindlichen Zellen und den Linienlaser aufgespannt, die sich in einer Geraden schneiden.



Der Einsatz einer zweiten Kamera verhindert überbelichtete Bilder, falls der Reflektionswinkel des Lasers an der Objektoberfläche gleich dem Beobachtungswinkel einer Kamera ist. Des Weiteren werden mögliche Verdeckungen auf der Objektoberfläche berücksichtigt (in Abbildung 2.3 sieht die linke Kamera nicht die Laserlinie auf dem Objekt). Zudem wird verhindert, dass in extrem flachen Beobachtungswinkeln zur Oberfläche gemessen werden muss, wenn sich der Sensor nicht weiter in eine Ecke bewegen lässt. Bei einem Laserlichtschnittsensor zur Profilvermessung ist die erwartete Lage der Laserlinie im Bild bekannt. Diese ist entweder horizontal oder vertikal zu erwarten.

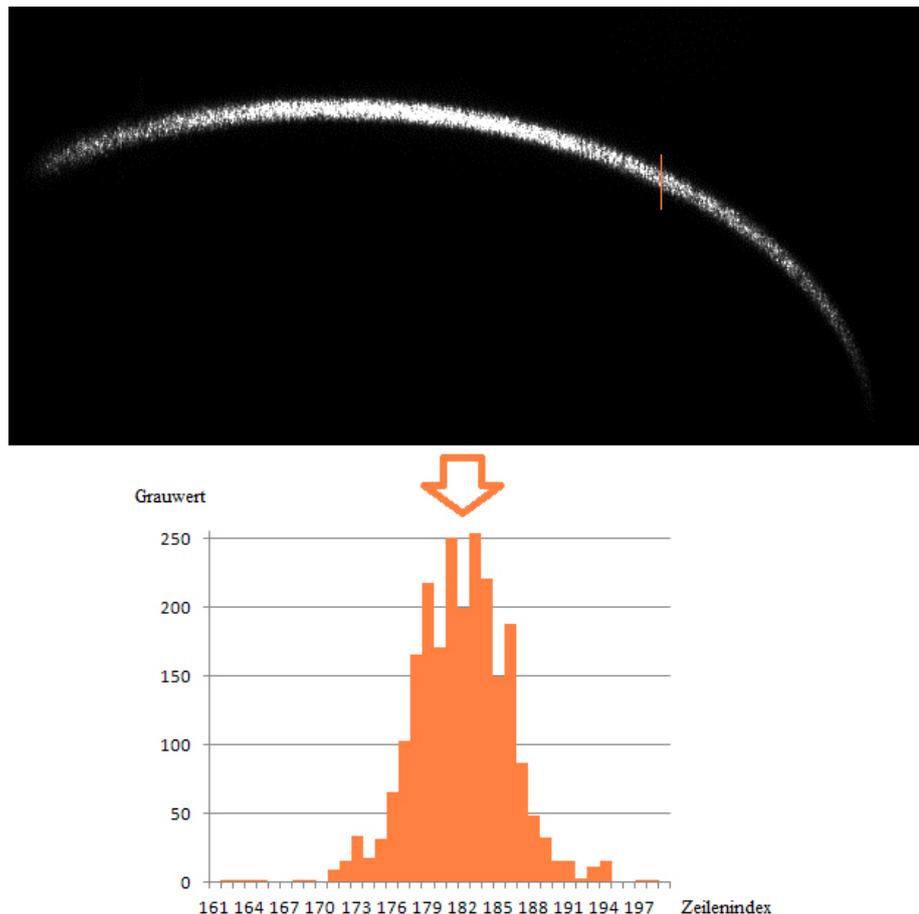
Die Kamera erzeugt Graubilder mit 8 Bit Farbtiefe. Das prototypische Messsystem soll zu einem günstigen Preis verfügbar sein. Deshalb werden keine speziellen und damit teuren Bauteile verwendet. Basierend auf den erzeugten Bildern soll die optimale Belichtung für den Messprozess geregelt werden. Bei diesem System wird derzeit die Belichtungszeit und Laserintensität vor dem Messprozess von Hand geregelt. Mit den ermittelten Einstellungen wird das Objekt vermessen. Das Ermitteln dieser Einstellungen soll im Zuge dieser Arbeit automatisiert werden.

2.3 Laserlinien

In diesem Abschnitt erfolgt die Betrachtung einzelner Bildaufnahmen, um auftretende Probleme aufgenommener Laserlinien zu verdeutlichen. Theoretisch entspricht die Intensitätsverteilung der Laserlinie einer Gauß-Verteilung [FN91]. Diese entsteht hauptsächlich aufgrund einer Aufspreizoptik, mittels derer der Laserstrahl zu einer Laserlinie gewandelt wird. Praktisch ist die theoretische Gauß-Verteilung durch mehrere Effekte gestört.

Die folgende Abbildung 2.4 zeigt die Profillinie einer Kugel.

Abb. 2.4: Profillinie einer Kugel mit sichtbarem Rauschen und Unter-/Überbelichtung entlang der Laserlinie. Des Weiteren ist als Beispiel der Helligkeitsverlauf entlang eines Querschnitts dargestellt.



Zunächst ist zu erkennen, dass sich eine aufgenommene Laserlinie bei geeigneter Belichtungszeit und Laserintensität deutlich von ihrem Hintergrund abhebt. Des Weiteren besitzt sie eine gewisse Breite (Anzahl heller Pixel entlang einer Bildspalte in Abbildung 2.4). In der Praxis ist die aufgenommene Laser-

2.4 Regelung

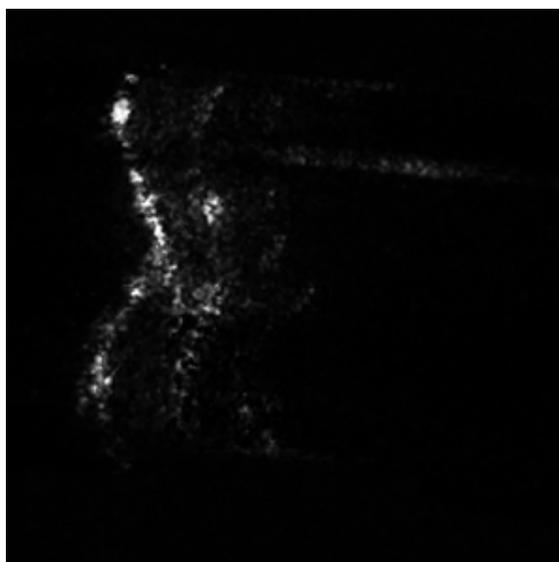
linie selten 1 Pixel breit. Die Breite richtet sich je nach verwendeter Aufspreizoptik und Abstand von Messobjekt und Messsystem.

Es ist der Effekt des Laserspekles sichtbar. Da die Wellenlänge des Laserlichts in der Größenordnung der Oberflächenrauheit ist und ein Großteil des Laserlichts gestreut zurückgeworfen wird, erscheint die Laserlinie verrauscht.

Des Weiteren sind Teile der Laserlinie unterbelichtet und es gibt einen überbelichteten Abschnitt. Diese Effekte entstehen durch die unterschiedlichen Oberflächennormalen der Kugel im Messbereich. Unterbelichtung entsteht aufgrund zu flacher Beobachtungswinkel der Kamera zur Oberfläche und Überbelichtung entsteht durch ähnlich großem Beobachtungswinkel und Einfallswinkel des Laserstrahls auf der Objektoberfläche. Bei einer überbelichteten Laserlinie ist die Spitze der Helligkeitsverteilung in der Bildspalte bzw. -zeile nicht mehr eindeutig ermittelbar, da mehrere nebeneinanderliegende Pixel den maximalen Intensitätswert (255) besitzen.

In der Abbildung 2.5 ist die Profillinie einer Brillenfassung dargestellt.

Abb. 2.5: Profillinie einer Brillenfassung mit teiltransparentem Material.



In diesem Bild sind mehrere nebeneinanderliegende Laserlinien zu sehen. Die erste vertikale Laserlinie (von links) ist die Primärreflektion. Das Material ist teiltransparent, es werden nicht alle Laserstrahlen an der Objektoberfläche reflektiert. Ein Teil der Laserstrahlen dringt in das Messobjekt ein, bevor sie zurückgeworfen werden. Dadurch sind Sekundärreflektionen rechts von der Primärreflektion zu sehen.

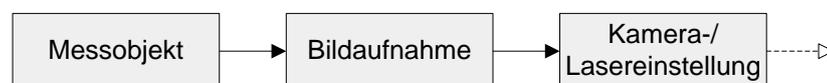
2.4 Regelung

Die Belichtung soll basierend auf Bildaufnahmen geregelt werden. In [wik11a] ist eine Regelung wie folgt beschrieben: „Die Regelung ist ein Vorgang in Systemen, in denen Wechselwirkung stattfindet [...], bei dem eine prinzipiell veränderliche (dynamische) Größe in der Regel automatisch konstant oder annähernd konstant gehalten wird.“ Bei der zu entwickelnden Regelung ist eine optimale Abbildung der Laserlinie gesucht, d. h. die veränderliche Größe ist die Qualität der Laserlinie.

Weiter heißt es in [wik11a]: „Wesentliche Eigenschaft des verbreitet anzutreffenden Vorgangs Regelung ist, dass der Wert der zu erhaltenden Größe festgestellt (Messung) und bei Abweichung von seinem gewollten Wert (Soll-Wert) durch entsprechende Wechselwirkung wieder hergestellt wird. Dem Abdriften vom Soll-Wert wird gegengesteuert, die Rückkopplung ist eine Gegenkopplung (Vorzeichenumkehr).“ Die zu entwickelnde Belichtungsregelung erzeugt zunächst eine Bildaufnahme mit initialen Parameterwerten (Belichtungszeit, Laserintensität) und bewertet die Qualität der Laserlinie. Aufgrund derer wird eine erneute Bildaufnahme veranlasst und die Bilder und ihre Parameterwerte analysiert. Durch die kontinuierliche Rückkopplung wird die Belichtung geregelt und so die Qualität der Laserlinie an ein Optimum angenähert. Dies ermöglicht auch eine Regelung während eines Messprozesses, bei dem z. B. ein Objekt mit nicht konstanten Oberflächeneigenschaften und/oder aus unterschiedlichen Beobachtungswinkeln vermessen wird.

Die vorhandene Rückkopplung grenzt eine Regelung von einer Steuerung ab. In Abbildung 2.6 ist eine Belichtungssteuerung dargestellt. Diese bestimmt aus einer Aufnahme die optimale Belichtungszeit und Laserintensität. Bei alleiniger Verwendung dieser Belichtungssteuerung im Messprozess sind der hohe Vorab-Aufwand für die Ermittlung der Werte der Lookup-Tabelle (bildet z. B. Linienbreite auf Belichtungszeit ab) und die eingeschränkte Einsatzmöglichkeit des Verfahrens von Nachteil.

Abb. 2.6: Das Diagramm zeigt den Aufbau einer Steuerung. Aufgrund einer Bildaufnahme werden die optimalen Parameterwerte für den Messprozess festgelegt.



Bei einer Regelung (Abbildung 2.7) ist die Ermittlung geeigneter Werte für die Bildaufnahme (Belichtungszeit und Laserintensität) abhängig von bereits erzeugten Aufnahmen.

Abb. 2.7: Das Diagramm zeigt den Aufbau einer Regelung. Im Gegensatz zur Steuerung besitzt ein Regler eine kontinuierliche Rückkopplung über den Wert der veränderlichen Größe. Die Ermittlung geeigneter Werte ist abhängig von bereits erzeugten Aufnahmen.



Der Regelkreis kann die Belichtungszeit der Kamera und/oder die Intensität des Lasers zur Ermittlung der optimalen Laserlinienabbildung nutzen. Die beiden Möglichkeiten werden im nächsten Abschnitt gegenübergestellt.

2.5 Belichtungszeit versus Laserintensität

Für die zu entwickelnde Belichtungsregelung werden in diesem Abschnitt die Vor- und Nachteile der Änderung der Belichtungszeit und/oder Laserintensität betrachtet.

Die Belichtungszeit darf nicht zu groß gewählt werden. Bei dem Messprozess fährt der Messkopf eine bestimmte Bahn ab und nimmt während der Bewegung mehrere Bilder der Laserlinie auf. Wird die Belichtungszeit zu groß gewählt, so erzeugt dies eine Bewegungsunschärfe im Bild. Durch die Bewegungsunschärfe wird das Speckle geglättet, jedoch führt sie auch zu einer Messunsicherheit bei der Bestimmung der Messposition. Besitzt das Messsystem keine Abschirmung zum Außenbereich (z. B. Sonnenlicht), so erzeugt eine Erhöhung der Belichtungszeit eine hellere Laserlinie, jedoch wird auch deren Umgebung heller und kann eine Differenzierung zwischen Laserlinie und Hintergrund erschweren.

Die Laserintensität darf nicht zu groß gewählt werden. Besitzen die von der Objektoberfläche reflektierten Strahlen eine zu hohe Energie, so können Personen gefährdet werden, wenn das Messsystem nicht abgeschirmt ist. Des Weiteren können die CCD-Chips der Kamera beschädigt werden.

Allgemein wirkt sich eine Änderung der Belichtungszeit meist global auf das gesamte Bild aus. Eine Änderung der Laserintensität zeigt meist nur lokale Auswirkungen im Bereich der Laserlinie. Die Anzahl der möglichen wählbaren Stufen für die Belichtungszeit und der Laserintensität variieren meist und können je nach verwendeten Komponenten eine stark unterschiedliche Auflösung besitzen.

Bei den praktischen Versuchen mit der (in dieser Arbeit) zu entwickelnden Belichtungsregelung wird nur die Belichtungszeit verändert. Diese ist mit genügend hoher Auflösung einstellbar. Das Messsystem nimmt fortlaufend Bilder auf und bei einer Änderung der Belichtungszeit kann bei einem Bild der dazugehörige Belichtungswert aus der Kamera ausgelesen werden. Zudem besitzt die Laserintensität einen festen bekannten Wert. Die Änderung der Laserintensität benötigt eine zusätzliche Schaltung, welche die Kosten des Messsystems erhöht. Des Weiteren lässt sich die Personengefährdung durch die festgelegte Laserintensität eingrenzen.

2.6 Schlussfolgerungen für die weitere Entwicklung

Beim Laserlichtschnitt ist eine optimale Abbildung der Laserlinie gesucht. Die dafür optimale Belichtung ist von mehreren Größen abhängig und kann u. a. mittels der Belichtungszeit und der Laserintensität im prototypischen Messsystem gesteuert werden. Für die zu entwickelnde Belichtungsregelung sind weiter folgende Schritte näher zu untersuchen:

1. Weitere mögliche Ansätze zur Regelung der Belichtung (neben den bereits vorgestellten).

2. Das Objekt von Interesse ist eine Laserlinie. Es wird ein robustes Verfahren zur Segmentierung der Laserlinie benötigt, um eine zuverlässige Bewertung der Qualität zu ermöglichen.
3. Mögliche Strategien zur Qualitätsbewertung der Laserlinie.

In Bezug auf die weiteren Schritte widmet sich das folgende Kapitel 3 dem aktuellen Stand der Technik.

In diesem Kapitel werden zunächst weitere mögliche Ansätze zur Belichtungsregelung/-steuerung vorgestellt. In der Literatur findet sich zu diesem Thema sehr häufig ein auf die Kamera bezogener Ansatz. Daher werden zuerst mögliche Software- und Hardwarelösungen für Kameras vorgestellt. Anschließend werden spezielle Lösungen für Messsysteme mit Laser dargelegt. Weiterführend wird die Segmentierung der Laserlinie für das zu entwickelnde Konzept zur Belichtungsregelung betrachtet. Anhand der segmentierten Laserlinie soll die Qualität bewertet werden. Dazu wird ein mögliches Bewertungsverfahren in einem Abschnitt vorgestellt. Abschließend erfolgt die Betrachtung von Verfahren zur Extraktion der Profillinie anhand der Intensitätsspitzen der Laserlinie. Dieser Abschnitt beschreibt das Ziel der Belichtungsregelung. Es soll eine optimale Abbildung der Laserlinie erzeugt werden, welche möglichst viel Informationen für die Extraktion der Profillinie liefert.

3.1 Belichtungsregelung der Kamera - Softwareansätze

Ein verbreiteter Ansatz ist die Erstellung und Auswertung eines Histogramms. Dazu wird eine Liste erzeugt, die für jeden Grauwert $[0, 255]$ die Anzahl der Pixel speichert [Jäh05]. Kameras für Vermessungsaufgaben, sowie weit verbreitete Konsumer-Digitalkameras haben eine Auflösung von 8 Bit (Grauwertbild) bzw. eine Farbtiefe von 24 Bit (jeweils 8 Bit für Rot, Grün und Blau). Der Grund sind geringe Kosten der Hardware, sowie eine genügend große Abstufung für ein Messsystem bzw. das menschliche Auge. Technisch sind jedoch auch größere Bittiefen bei der Bildaufnahme/-verarbeitung möglich. So werden z. B. in der medizinischen Bildverarbeitung CT-Bilder mit 12 Bit (4096 Graustufen) verwendet, da hier eine höhere Abstufung von Grauwerten (und damit bessere Abstufung von Gewebestärken) benötigt wird.

Basierend auf [Shi04] und [KCCL11] existieren mehrere Möglichkeiten für eine Auswertung eines Histogramms für die Belichtungsregelung. Am weitesten verbreitet ist die Berechnung des mittleren Grauwertes zur Bestimmung der optimalen Belichtung. Mit Hilfe des Histogramms wird der mittlere Grau-

wert μ_{grau} mit folgender Gleichung 3.1 bestimmt, dabei bezeichnet i den Grauwert/Index im Histogramm und $p(i)$ die Auftrittswahrscheinlichkeit.

$$\mu_{\text{grau}} = \sum_{i=0}^{255} ip(i) \quad (3.1)$$

Eine optimale Belichtung wird angenommen, wenn der mittlere Grauwert μ_{grau} einen Wert von 127 hat.

Bei Verwendung einer Farbkamera kann das Bild vor einer Histogrammanalyse in ein Graubild umgewandelt werden. Die Belichtung kann auch basierend auf einem Farbkanal erfolgen. Dazu eignet sich der Grün-Kanal, da das menschliche Auge am empfindlichsten für den Grünton ist und das Histogramm des Grün-Kanals dem des Graubildes ähnelt. Nachteilig bei dieser Methode ist, dass zwar ein Farbkanal eine geeignete Verteilung haben kann, jedoch ein anderer Farbkanal (z. B. Rot) möglicherweise übersteuert ist. Dies kann zu einem Farbstich in der fertigen Bildaufnahme führen. Teurere Kameras bieten daher eine Vorschau der Histogramme der einzelnen Farbkanäle und ermöglichen so einen Weißabgleich.

Die Abbildung 3.1 zeigt als Beispiel ein aufgenommenes Bild. Das Bild wurde basierend auf der Gleichung für die Luminanz 3.2 in ein Graubild umgewandelt.

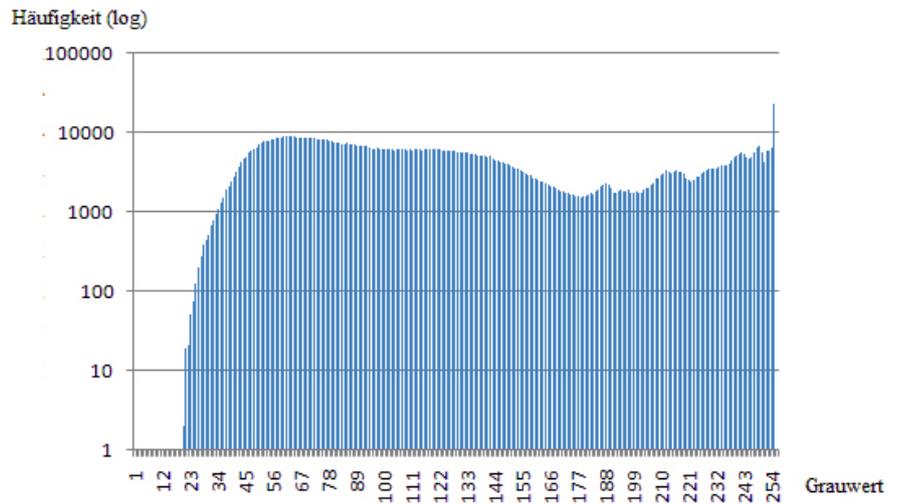
$$\text{Grauwert} = \text{Lum} = 0,3 \cdot \text{Rot} + 0,59 \cdot \text{Grün} + 0,11 \cdot \text{Blau} \quad (3.2)$$

Das dazugehörige Histogramm (Abbildung 3.2) hat einen mittleren Grauwert von 127,91 [0, 255]. Dieser weist auf eine geeignete Belichtung hin.

Abb. 3.1: Beispielbildaufnahme mittels Digitalkamera.



Abb. 3.2: Histogramm der Abbildung 3.1. Die X-Achse bezeichnet die Grauwerte 0 bis 255. Die Y-Achse zeigt die Häufigkeit der Intensitätswerte (logarithmisch skaliert).



Bei einer Unterbelichtung befindet sich der Schwerpunkt der Intensitätsverteilung im unteren Teil des Histogramms (äquivalent im oberen Teil bei Überbelichtung).

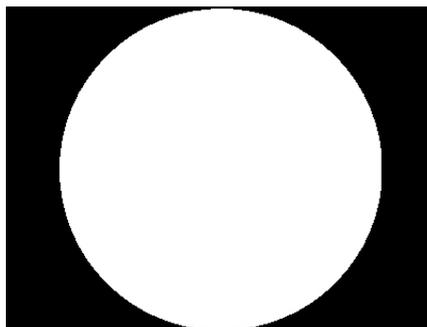
Nach [Shi04] existieren folgende weitere (weniger verbreitete) Möglichkeiten zur Nutzung eines Histogramms für die Bestimmung der optimalen Belichtung:

1. Die Verwendung der Standardabweichung, z. B. die Annahme, dass der Kontrast und Informationsgehalt maximal ist, wenn dieser Wert maximal ist.
2. Die maximale Entropie der Verteilung: $Entropie = -\sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \log_2 N$
3. Ein bestimmter Prozentsatz der Pixel soll in einem bestimmten Bereich (z. B. [50, 255]) verteilt sein.
4. Das ACM-Verfahren (Absolute Central Moment), basierend auf einem mittels mittleren Grauwert gewichteten Histogramms:

$$ACM = \sum_{i=0}^{255} (i - \mu)p(i)$$

Die Ansätze können erweitert werden, indem die Pixel anhand einer Bildmaske gewichtet werden [NR07]. Hierbei ist die Annahme, dass das Objekt von Interesse bei einer Bildaufnahme relativ mittig platziert ist. Für eine Analyse der optimalen Belichtung werden daher nur die Pixel ausgewertet, die in folgender Abbildung 3.3 im weißen Kreis sind.

Abb. 3.3: Beispiel einer Booleanschen Bildmaske. Nur die Pixel im weißen Kreis werden für die Analyse der Belichtung betrachtet.



Eine weitere Möglichkeit ist eine Gewichtung der Pixel anhand ihres Bildzeilenindex, um z. B. die Auswirkung eines hellen Himmels auf die Auswertung zu minimieren [NR07].

Eine andere Klasse von Verfahren versucht das Bild nach der Aufnahme (mit nicht optimaler Belichtung) zu korrigieren. Dazu wird das Histogramm und damit die Bildaufnahme transformiert. Es existieren viele Möglichkeiten (siehe [Jäh05]), u. a. Histogrammverschiebung, -spreizung, -stauchung, -äqualisation. Die grundlegende Strategie ist, die vorliegende Verteilung der Grauwerte in eine andere Verteilung zu überführen (z. B. die Überführung in eine Gleichverteilung zur Verbesserung des Kontrasts). Bei diesen Verfahren werden keine neuen Informationen aus der Bildaufnahme gewonnen. Objekte, die bei der Bildaufnahme schwarz abgebildet wurden, bleiben auch schwarz. Die Verfahren ermöglichen jedoch (im eingeschränkten Rahmen) die Erzeugung eines, für den Nutzer, subjektiv geeignet belichteten Bildes.

Ein Nachteil bei der Verwendung von Histogrammen ist die fehlende Nutzung von High-Level-Informationen. Es werden lediglich unspezifische Pixeldaten als Low-Level-Information genutzt, d. h. die optimale Belichtung wird unabhängig davon berechnet, ob das gewünschte Objekt in der aufgenommenen Szene optimal abgebildet ist.

Eine andere Strategie ist die Erzeugung und Auswertung einer Gradientenkarte. In [NRW06] wird ein Verfahren vorgeschlagen, bei dem in schneller Abfolge 3 Bilder mit unterschiedlicher Belichtungszeit aufgenommen werden. Bei den aufgenommenen Bildern werden die Bildintensitäten abgeleitet und somit Gradientenkarten erzeugt. Das optimal belichtete Bild setzt sich aus den 3 aufgenommenen Bildern zusammen. Für jeden Pixel wird aus den 3 aufgenommenen Bildern der Pixelwert genommen, bei dem der Gradient in der dazugehörigen Gradientenkarte maximal ist. Das zugrunde liegende Konzept ist, dass der Informationsgehalt maximal ist, wenn der Gradient maximal ist.

In [LM09] wird das aufgenommene Objekt segmentiert, um die optimale Belichtung zu ermitteln. Hier wird versucht, High-Level-Informationen zu benutzen. Bei dem vorgestellten Ansatz werden zunächst Verkehrsschilder segmentiert (binarisiert), der Teilausschnitt auf eine bestimmte Größe skaliert und mit einer vorhandenen Datenbasis von schematischen Verkehrsbildern verglichen. Die optimale Belichtung wird auf den Bereich des segmentierten Objektes ausgerichtet. In [KHKC06] findet sich eine äquivalente Strategie. Hier werden zunächst Gesichter und bewegliche Objekte segmentiert. Basierend auf einer Datenbasis von über 2000 Bildern und ihren optimalen Belichtungsparametern (Belichtungszeit, Blendenzahl) wird die geeignete Belichtung berechnet.

Eine Segmentierung des aufgenommenen Objektes eignet sich für die zu entwickelnde Belichtungsregelung, da ein Verfahren unter Ausnutzung von Low-Level-Information (z. B. Histogramm) die Objektinformationen, beispielsweise ein unterschiedliches Größenverhältnis von Laserlinie zum Bild und Intensitätsverteilung der Laserlinie, nicht berücksichtigt.

Wird eine Bildreihe von einer bewegten Szene erstellt (z. B. Sportmotiv), so kann ein störendes Flickern entstehen, wenn ein Wechsel der Belichtungszeit relativ häufig geschieht. In den Arbeiten von [PKJ09] und [KCCL11] findet sich ein Konzept zum Verhindern von Flickern während der Aufnahme von

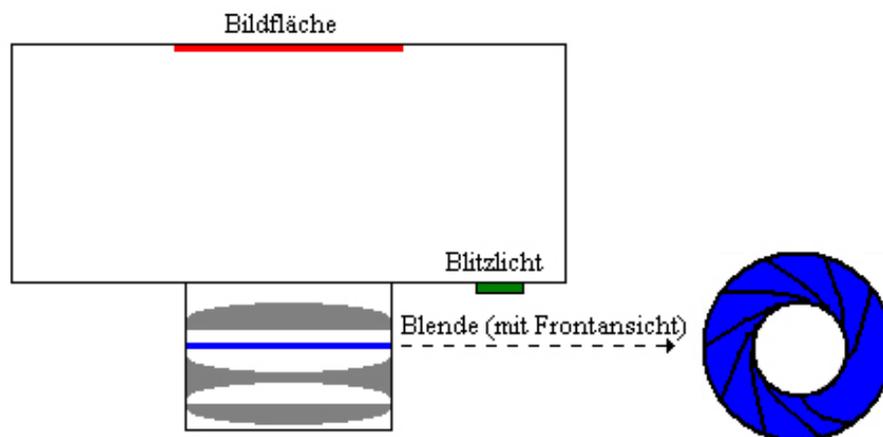
Bildreihen. Bei der dort beschriebenen Strategie werden mögliche Kameraparameter (Belichtungszeit, Blende, ..) in diskreten Schritten festgelegt, die für eine Bildaufnahme benutzt werden können. Dieser Ansatz eignet sich für die zu entwickelnde Belichtungsregelung, da jede Änderung der Laserintensität/Belichtungszeit die Dauer des Messprozesses erhöht, wenn während des Messprozesses kontinuierlich geregelt werden soll.

3.2 Belichtungsregelung der Kamera - Hardwareansätze

Viele der im vorherigen Abschnitt vorgestellten Verfahren sind bereits in Hardware realisiert worden. In [NWL⁺03] findet sich z. B. eine einfache Implementierung einer histogrammbasierten Methode mittels eines FPGAs. Das FPGA berechnet den mittleren Grauwert und ermittelt die optimale Belichtung anhand eines mittleren Grauwertes von 127 [0, 255].

Im Folgenden werden weitere Hardwareansätze zur Belichtungsregelung in einer digitalen Kamera vorgestellt. Die Abbildung 3.4 zeigt schematisch eine Digitalkamera mit häufig genutzten Komponenten zur Regelung der Belichtung.

Abb. 3.4: Vereinfachtes Schema einer Digitalkamera mit Komponenten, die zur Belichtungsregelung genutzt werden. Dargestellt ist das Objektiv mit Linsen (grau) und der Blende (blau), die Bildfläche (rot) mit Intensitätssensoren und das Blitzgerät (grün).



Die Bildfläche der Kamera kann mit CCD- oder CMOS-Sensoren bestückt sein. CCD- und CMOS-Sensoren basieren beide auf Halbleiter, besitzen aber jeweils Vor- und Nachteile. In [Lit01] wird beschrieben, dass CCD-Sensoren allgemein einen höheren Dynamikumfang, weniger Rauschen und damit eine bessere Bildqualität (speziell bei wenig Licht) besitzen. Hat die Bildqualität den Vorrang, so werden meist CCD-Sensoren eingesetzt. CMOS-Sensoren besitzen dagegen aufgrund separater Verarbeitung jedes Pixels eine natürliche Immunität gegenüber Blooming. Bei CCD-Sensoren werden Informationen erst nach dem Auslesen bearbeitet. In CMOS-Sensoren ist eine Verarbeitung individuell in jedem Chip realisiert und ermöglicht eine Informationsverarbeitung vor dem Auslesen. Dies ermöglicht z. B. eine logarithmische Abbildung der Ladungen auf einen Pixelwert (HDR-Kamera wird im Folgenden vorgestellt), um übersteuerte Bildaufnahmen zu verhindern.

Kameras besitzen häufig eine Blende. Diese kann mittels Lamellen (siehe Abbildung 3.4) die Öffnung des Objektivs steuern. Neben der Schärfentiefe regelt die Blende die Lichtmenge, welche die Bildebene mit den CCD-/CMOS-Sensoren erreicht. In [Wes08] wird beschrieben, dass Kameras meist über mehrere Belichtungsmodi verfügen:

1. Eine Programmautomatik stellt basierend auf einem gewählten Profil (z. B. Sport, Landschaft) und der integrierten Datenbasis die Werte für Belichtungszeit und Blende automatisch ein.
2. Bei einer Blendenautomatik wird die Belichtungszeit manuell gewählt und die Kamera stellt die Blende automatisch ein.
3. Eine Zeitautomatik wählt automatisch die Belichtungszeit bei manuell eingestellter Blende.
4. Der manuelle Modus ermöglicht die manuelle Wahl von Belichtungszeit und Blende.

Diese Belichtungsmodi werden hauptsächlich aufgrund des Motivs gewählt. So wird beim Sport eine Blendenautomatik verwendet, um eine geringe Bewegungsunschärfe bei der Aufnahme zu erhalten.

Bei der Kamera findet sich des Weiteren sehr häufig eine Blitzlichtfunktion. Ein Blitzgerät kann aktiv die Objektbeleuchtung für die Dauer der Bildaufnahme erhöhen. Dieses kann eingesetzt werden, wenn bei einer Aufnahme eine kurze Belichtungszeit gewünscht ist (Sport-Motiv), jedoch zu wenig Umgebungslicht vorhanden ist.

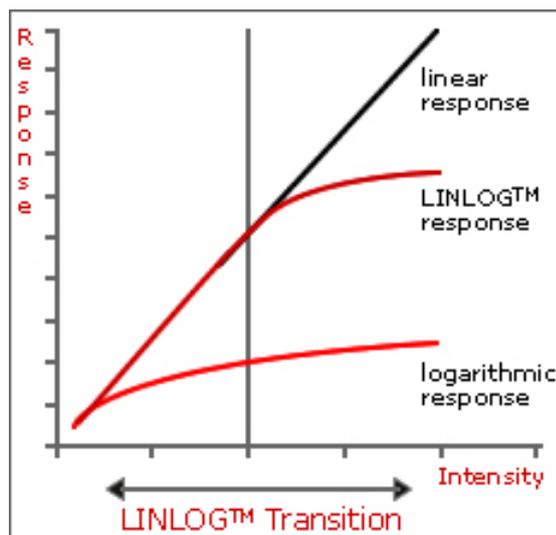
Neben der elektronischen Belichtungszeit (Zeit bis zum Auslesen des CCD- bzw. CMOS-Sensors) kann auch eine Steuerung der Belichtung mittels mechanischen Verschlusses geschehen. Ein einfacher Verschluss besitzt nur eine Lamelle, welche mittels eines Hebels den Zugang des Lichts zur Bildebene öffnet und mittels einer Feder wieder verschließt. Ein mechanischer Verschluss kann sich im Objektiv oder im Kameragehäuse befinden. Nach [wik11b] werden zurzeit hauptsächlich zwei weitere Verschlussarten verwendet. Dies ist der Zentralverschluss und der Schlitzverschluss. Ein Zentralverschluss befindet sich im Objektiv und verwendet Lamellen wie bei einer Blende. Diese schließen sich, im Gegensatz zur Blende, komplett. Ein Schlitzverschluss befindet sich vor der Bildebene. Bei einer Bildaufnahme laufen dort zwei Vorhänge mit Schlitz in entgegengesetzter Richtung aneinander vorbei. Die Breite des Schlitzes steuert die Belichtungszeit der Bildebene.

Eine weitere Möglichkeit der Belichtungssteuerung ist ein Belichtungsmesser. Diesen gibt es als eigenständiges Gerät, am Kamera-/Objektivgehäuse oder in interner Form hinter dem Objektiv (TTL-Belichtungsmessung, siehe [Wes08]). Belichtungsmesser in modernen Kameras nutzen Photodioden, um den einfallenden Lichtstrom pro Fläche zu messen. Daraus werden die Werte für die Belichtungszeit und die Blende bestimmt. Ein Belichtungsmesser kann mit einem Blitzgerät kombiniert werden. Dabei wird, mittels eines Vorblitzes vor der Bildaufnahme, das geeignete Verhältnis zwischen Blitz- und Umgebungslicht bestimmt.

Es existieren Hardware-Lösungen, die das Problem der Überbelichtung vermindern. Dazu zählen die Multiple-Slope-Kamera (beschrieben in [SGG07]) und die HDR-Kamera (beschrieben in [Sch06]). Diese Kameras bilden die aufgenommene Lichtenergie nicht linear auf einen Pixelwert ab. Eine Multiple-Slope-Kamera besitzt mehrere diskrete Zeitstufen während der Belichtungszeit. Nach Ablauf jeder Zeitstufe werden die Pixel überprüft. Ist ein Pixel zu hell, wird er auf den Default-Wert der jeweiligen Stufe zurückgesetzt. Bei einer HDR-Kamera wird die aufgenommene Lichtmenge logarithmisch auf einen Pixelwert abgebildet. In [BGH⁺06] werden einige Einsatzorte genannt, die von Kameras mit hohem Dynamikumfang profitieren. Genannt werden u. a. die Inspektion metallischer Oberflächen mittels Laserlichtschnitt, Fahrassistenzsysteme für den Nachteinsatz und der Einsatz in der Endoskopie.

Die vorgestellte Hardware-Lösung reduziert Überbelichtung bei einer Bildaufnahme, sie reduziert jedoch auch den Kontrast. Die Firma „Photonfocus“ bietet mit der LinLog™-Technologie (siehe [LIN]) einen Kompromiss. Die Firma bietet Sensoren an, bei denen sich festlegen lässt, wann zwischen linearer und logarithmischer Abbildung gewechselt werden soll (siehe Abbildung 3.5). Der Nachteil der Lösung ist, dass die Werte der Sensorparameter bei Beleuchtungsänderung angepasst werden müssen, um eine konstante Bildqualität sicherzustellen [Sch06].

Abb. 3.5: Die Abbildung ist der Webseite von Photonfocus [LIN] entnommen und zeigt den Vergleich zu einem (klassischen) linearen Intensitätssensor und einem logarithmischen Intensitätssensor.



Allgemein sind Kameras mit erhöhtem Dynamikumfang wesentlich teuer als Konsumer-Kameras und daher (noch) nicht für kostengünstige Messsysteme einsetzbar.

Der nächste Abschnitt widmet sich weiteren Ansätzen zur Belichtungsregelung, speziell für Messsysteme mit Laser.

3.3 Belichtungsregelung - Ansätze für Laserlichtschnitt

Ein Ansatz zur Regelung der Belichtung bei einem Messsystem mit einem Punktlaser findet sich in [CJK90]. Bei diesem Verfahren wird der aufgenommene Lichtkreis segmentiert und der Durchmesser ermittelt. Wenn dieser größer als ein vorgegebener Schwellwert ist, so wird die Belichtungszeit gesenkt (bzw. erhöht, wenn der ermittelte Durchmesser zu klein ist).

In [PS06] werden die Vor- und Nachteile von Punkt- und Linienlasern verglichen. Es wird erwähnt, dass die Belichtungsregelung bei einem Linienlaser ein Problem ist, da die Oberflächenbeschaffenheit als konstant angenommen werden muss, um zuverlässige Messdaten zu erhalten.

Bei einem Messsystem kann ein Farbglasfilter in der Kamera platziert werden, der nur für Licht im Bereich der Wellenlänge des Lasers durchlässig ist. Dieser Ansatz wird in [KC99] erwähnt, dort besitzt der Laser eine Wellenlänge von 670 nm und der Farbglasfilter ist nur für Wellenlängen im Bereich von 670 nm durchlässig. Bei diesem Ansatz wird der Anteil gesenkt, den das Umgebungslicht auf die Belichtung des CCD-Sensors hat. In der Arbeit von [MKMT02] werden zwei weitere Methoden zur Senkung des Einflusses des Umgebungslichtes erwähnt. Eine Möglichkeit ist die Verwendung eines gepulsten Lasers und einer Kamera mit schnellem Verschluss. Die zweite Möglichkeit ist die Extraktion des Hintergrundes. Dies ist besonders wichtig bei einem Messsystem, das im Außenbereich eingesetzt werden soll. Um dies zu erreichen, kann (wie in [IM10] beschrieben) bei einem Bild der Laser aktiviert werden und beim zweiten Bild deaktiviert werden. Die Differenz der beiden Bilder eliminiert den Hintergrund.

In den Arbeiten von [Teu03] und [Teu07] werden bei Lichtschnittsensoren die Einflussfaktoren auf die Qualität des Messergebnisses betrachtet. Die Arbeiten konzentrieren sich hauptsächlich auf die Beurteilung der, durch das Messsystem, erzeugten Punktwolke und leiten daraus Rückschlüsse für den Vorgang des Vermessens ab. Ein dort beschriebener Teilaspekt ist die Qualität der 2D-Information aus dem aufgenommenen Bild der Laserlinie. Faktoren sind die Präzision der Segmentierung und der Kontrast des Bildes. In [Teu07] wird zur Segmentierung der Laserlinie das Bild im ersten Schritt binarisiert (basierend auf einem Schwellwert). Danach wird eine Skelettierung angewendet, um das Zentrum der Kontur zu bestimmen. Die ermittelten Konturpunkte beschreiben die Profillinie. Zur Ermittlung der Intensitätsspitze (Peak Detection) wird auf den Laserlinienquerschnitten an den Konturpunkten ein Kantendetektor (Laplace) angewendet. Es lassen sich nun die beiden Wendepunkte der Intensitätsverteilung ermitteln. Aus Mittelung der Position der 2 Wendepunkte ergibt sich die Intensitätsspitze. Daraus ergibt sich als Qualitätskriterium der Kontrast des Bildes und die Breite der Laserlinie (beeinflusst die Bestimmung der Wendepunkte bei der Peak Detection). Das vorgestellte Segmentierungsverfahren und die Bewertung der Qualität der Laserlinie werden in den folgenden Abschnitten 3.4 und 3.5 aufgegriffen und bewertet. An dieser Stelle sei jedoch angemerkt, dass zwar Ideen zur Qualitätsbewertung der Laserlinie existieren, es jedoch an Literatur mangelt, die ein automatisches Regelungskonzept aufgrund eines festgelegten Qualitätsbewertungsverfahrens für die Laserlinienabbildung beschreibt. Eine Regelung basierend auf einer 2D-Abbildung ermöglicht einen schnellen automatisierten Messprozess (statt komplexer Analyse von 3D-Messdaten).

Ein Regelungskonzept soll in dieser Arbeit entwickelt werden. Für die Entwicklung werden als weitere Grundlage die folgenden Abschnitte 3.4 und 3.5 genutzt. Diese behandeln die Segmentierung der Laserlinie (die optimale Belichtung soll anhand derer bewertet werden) und eine Möglichkeit zur Bewertung einer Laserlinie (entnommen aus einer unveröffentlichten Arbeit [Sch04]).

3.4 Segmentierung der Laserlinie

In [Fut11] werden modellbasierte Verfahren zur Segmentierung der Laserlinie vorgestellt und deren Vorteile gegenüber anderen Ansätzen betrachtet. Darin wird ein Verfahren, basierend auf Snakes [KWT88], für die Segmentierung empfohlen. Dieses soll für die Belichtungsregelung verwendet werden. Im Folgenden wird das Verfahren zusammengefasst aus [Fut11] beschrieben.

3.4.1 Modellbasierte Segmentierung mittels Snake

Das Snake-Modell beschreibt eine Kontur durch eine Energiefunktion. Diese ist mittels eines mit Kontrollpunkten erzeugten Splines beschrieben. Die folgende Abbildung 3.6 zeigt ein Linienmodell für die Segmentierung der Laserlinie.

Abb. 3.6: Ein Linienmodell mittels Snake-Modell konstruiert. Die orangen Kreise repräsentieren die Kontrollpunkte. Die verbindenden Linien visualisieren die Topologie, sind jedoch nicht Bestandteil des Modells.



Die Energiefunktion der Snake ist durch folgende Gleichung 3.3 definiert:

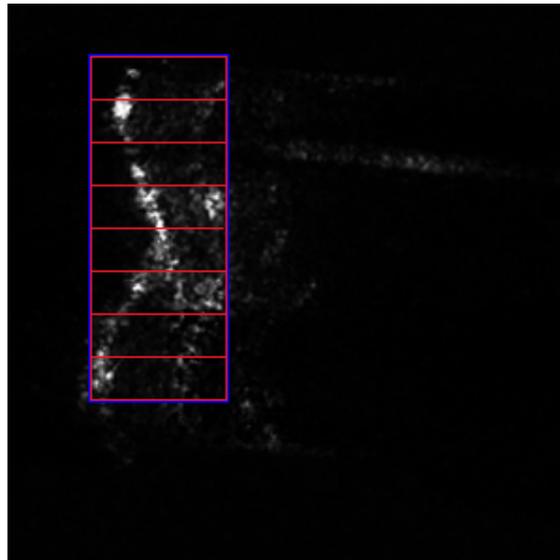
$$E_{snake}^* = \int_0^1 E_{int}(i) + E_{ext}(i) \quad (3.3)$$

Die interne Energie E_{int} ist durch den Spline definiert. Diese ist niedriger, je weniger Krümmungen auftreten. Die Kontrollpunkte des Splines repräsentieren Bildmerkmale und sind mit der externen Energie E_{ext} verknüpft. Verwendet man diesen Ansatz aus [KWT88] für die Segmentierung einer Laserlinie, so erzeugt ein Kontrollpunkt auf einem dunklen Pixel eine hohe externe Energie. Der Kontrollpunkt erzeugt eine geringe externe Energie, wenn er sich auf der Laserlinie befindet. Der Segmentierungsprozess ordnet das Linienmodell der Abbildung zu, indem die Energie minimiert wird. Dazu werden die interne und externe Energie abgeleitet (detaillierte Beschreibung findet sich in [Fut11]). Da der Zustand $E_{snake}^* = 0$ praktisch nicht erreicht wird, gilt der Segmentierungsprozess als abgeschlossen, wenn die Summe der Bewegung der einzelnen Kontrollpunkte einen festgelegten Schwellwert unterschreitet.

3.4.2 Modellgenerierung

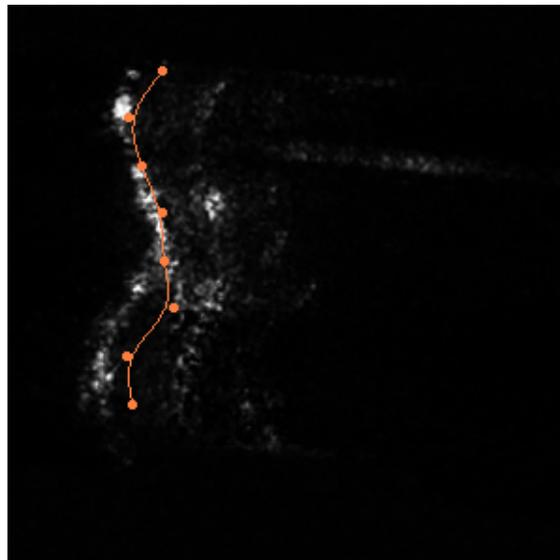
Für die automatische Segmentierung der Laserlinie wird ein Linienmodell in mehreren Schritten erzeugt. Im ersten Schritt wird dazu der interessante Bildbereich ermittelt. Dies ist die erste und letzte Bildspalte bzw. -zeile, in der ein Pixelwert einen festgelegten Schwellwert überschreitet. Es ergibt sich als ROI (Region Of Interest) ein Rechteck, in welchem das Linienmodell platziert werden soll (siehe Abbildung 3.7). Im zweiten Schritt werden die Kontrollpunkte des Linienmodells in den Teilbereichen des ROI platziert. Die Anzahl der Kontrollpunkte wird für eine Laserlinienabbildung automatisch bestimmt und ihre Platzierung innerhalb des Teilbereichs durch das jeweilige Zentrum der Intensität festgelegt (detaillierte Beschreibung in [Fut11]).

Abb. 3.7: Die Abbildung zeigt das ROI (blau), in welchem das Linienmodell platziert werden soll. Für die aufgenommene Laserlinie wurden 8 Kontrollpunkte für das Linienmodell ermittelt. Jeder Kontrollpunkt soll einem der Teilbereiche (rot) zugeordnet werden.



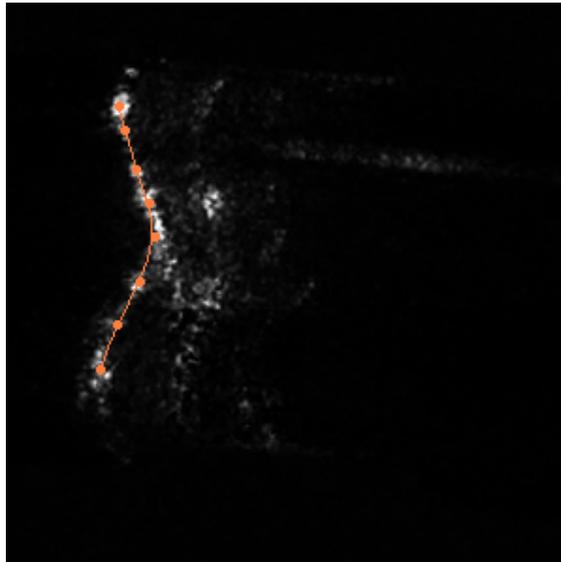
Die Modellgenerierung ermöglicht bereits eine gute Platzierung des Linienmodells nahe der zu segmentierenden Primärreflektion (Abbildung 3.8).

Abb. 3.8: Ein Linienmodell nach der Modellgenerierung.



Die Anwendung des Segmentierungsprozesses ermöglicht eine erfolgreiche Segmentierung der Laserlinie (Abbildung 3.9) trotz auftretender Sekundärreflektionen und Unterbrechungen der Laserlinie aufgrund von Unterbelichtung. Diese Effekte sind problematisch bei dem in [Teu07] vorgeschlagenen Segmentierungsverfahren mittels Skelettierung. Daher soll das modellbasierte Segmentierungsverfahren für die zu entwickelnde Belichtungsregelung eingesetzt werden.

Abb. 3.9: Das Linienmodell nach abgeschlossenem Segmentierungsprozess.



Nach der Segmentierung der Laserlinie kann eine Qualitätsbewertung vorgenommen werden.

3.5 Qualitätsbewertung der Laserlinie

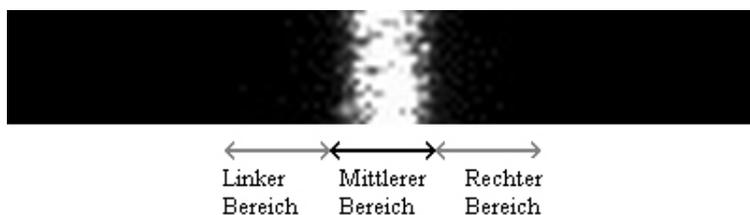
Am Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung in Magdeburg wurde von Christian Schachner in einer unveröffentlichten Arbeit [Sch04] ein Ansatz zur Bewertung der Qualität einer Laserlinie entwickelt. Das Konzept sieht (wie in der Arbeit von [Teu07]) vor, bestimmte Merkmale eines Laserlinienquerschnitts zu bewerten. In der Arbeit werden jedoch noch weitere bewertbare Merkmale vorgestellt. Das Konzept mit seinen für diese Arbeit wichtigen Inhalten wird im Folgenden zusammengefasst beschrieben.

Bei diesem Ansatz werden Merkmale der Laserlinie auf Kennzahlen im Bereich $[0, 100]$ abgebildet. Der Wert 100 bedeutet eine optimale Ausprägung eines Merkmals, der Wert 0 bedeutet eine sehr schlechte Ausprägung. Die Laserlinie wird anhand von Querschnitten ausgewertet. Diese werden aus Bildzeilen oder -spalten (je nach erwarteter Lage der Laserlinie) entnommen.

3.5.1 Bestimmung des Auswertungsbereiches

In jeder Bildzeile bzw. -spalte wird zunächst ein Bereich ausgewählt, dessen Helligkeitsverlauf bewertet werden soll. Dazu wird ein Untersuchungsbereich, basierend auf 3 nebeneinanderliegenden Teilbereichen mit manuell festlegbarer Größe, definiert. Im mittleren Bereich sollen sich die hohen Intensitäten der Laserlinie befinden und im linken und rechten Bereich die Randgebiete. Abbildung 3.10 veranschaulicht ein Beispiel. Vorgeschlagen wird eine jeweilige, gleiche Größe der Teilbereiche von 25 Pixeln.

Abb. 3.10: Bereichsunterteilung eines Laserlinienquerschnitts.



Der Untersuchungsbereich wird in Pixelschritten von Zeilenanfang bis -ende (bzw. Spalte bei horizontaler Laserlinie) verschoben. In jedem der 3 Teilbereiche des Untersuchungsbereiches wird jeweils die mittlere Helligkeit MH_{links} , MH_{mitte} und MH_{rechts} bestimmt und eine Kennzahl $K_{Mittelwert}$ berechnet (siehe Gleichung 3.4).

$$K_{Mittelwert} = (MH_{mitte} - MH_{links}) + (MH_{mitte} - MH_{rechts}) \quad (3.4)$$

Es wird für die jeweilige Bildzeile bzw. -spalte derjenige Untersuchungsbereich für die Qualitätsbewertung ausgewählt, dessen ermittelte Kennzahl $K_{Mittelwert}$ maximal ist. Dieses Verfahren wählt für jede Bildzeile bzw. -spalte einen Untersuchungsbereich, auch wenn dort kein Teil der Laserlinie abgebildet ist. Daher wird dieser weiter klassifiziert. Dazu werden im mittleren Teilbereich die Pixel mit ihrer Helligkeit H_{mitte} gezählt, bei denen die Bedingung 3.5 gilt. Die Variable H_{diff} legt eine bestimmte Helligkeitsdifferenz fest, um Laserlinie und Hintergrund zu unterscheiden.

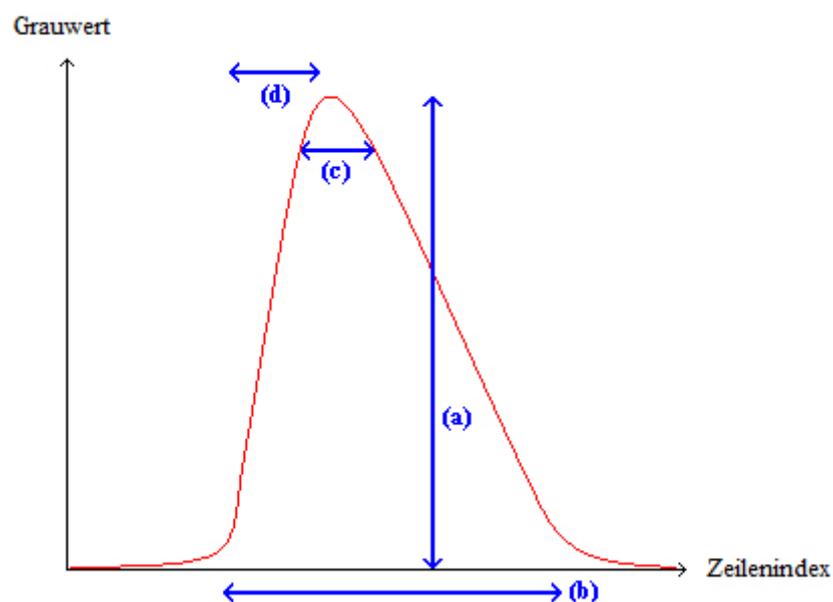
$$H_{mitte} > \max(MH_{links}, MH_{rechts}) + H_{diff} \quad (3.5)$$

Als Kriterium für die weitere Verwendung des Untersuchungsbereiches wird vorgeschlagen, dass mindestens 5 Pixel die Bedingung erfüllen müssen und die Helligkeitsdifferenz H_{diff} mindestens 10 Graustufen betragen muss.

Im nächsten Schritt werden die Grenzen des auszuwertenden (mittleren) Teilbereiches justiert. Dazu wird jeweils von links und rechts der 1. Pixel gesucht, bei dem die Bedingung 3.5 gilt. Existieren keine Grenzen, so wird der Verlauf als ungültig markiert und nicht weiter ausgewertet.

Die ausgewählten Laserlinienquerschnitte werden anhand der Qualität des mittleren Untersuchungsbereiches bewertet. Auszuwertende Merkmale für die Qualität sind Helligkeitsdifferenz, Verlaufsweite, Kammbreite und homogener Helligkeitsverlauf (siehe Abbildung 3.11). Jedem Merkmal wird gemäß seiner Qualität eine Kennzahl zugeordnet.

Abb. 3.11: Schematische Darstellung der auszuwertenden Merkmale eines Laserlinienquerschnitts. Diese sind die Helligkeitsdifferenz (a), die Verlaufsweite (b), die Kammbreite (c) und die Homogenität (d) des Helligkeitsverlaufs der Flanken.



3.5.2 Merkmal Helligkeitsdifferenz

Für die Berechnung der Kennzahl wird zunächst im mittleren auszuwertenden Untersuchungsbereich der maximale Helligkeitswert $H_{max\ aB}$ und der maximale Helligkeitswert $H_{max\ rB}$ im Randbereich (linker/rechter Untersuchungsbereich) gesucht. Daraus ergibt sich die Helligkeitsdifferenz $M_{\Delta H}$ anhand von Gleichung 3.6.

$$M_{\Delta H} = H_{max\ aB} - H_{max\ rB} \quad (3.6)$$

Basierend auf der berechneten Differenz wird die Kennzahl $K_{z\Delta H}$ für das Merkmal Helligkeitsdifferenz berechnet (Gleichung 3.7). Dabei wird mittels der sogenannten Helligkeitstoleranz H_{To} skaliert. Diese soll eine Unabhängigkeit von der Grundhelligkeit erzeugen, welche je nach Integrationszeit und Umgebungslicht variiert. Für H_{To} wird ein Wert von 50 vorgeschlagen.

$$K_{z\Delta H} = \begin{cases} 100, & \text{wenn } M_{\Delta H} > 255 - H_{To} \\ (M_{\Delta H})^2 \frac{100}{(255 - H_{To})^2}, & \text{andernfalls} \end{cases} \quad (3.7)$$

Diese Kennzahl ist entsprechend maximal (100), wenn der Kontrast zwischen Laserlinie und Hintergrund maximal ist.

3.5.3 Merkmal Verlaufsweite

Zur Ermittlung der Kennzahl wird die Verlaufsweite betrachtet. Dies ist die Breite des mittleren Untersuchungsbereiches in Pixeln. Dazu wird zuvor die maximale erlaubte Verlaufsweite Vb_{max} (vorgeschlagen wird 20 Pixel), die minimale theoretische Verlaufsweite Vb_{min} (kein Wert vorgegeben) und die optimale Verlaufsweite Vb_{opt} (vorgeschlagen wird 7 Pixel) manuell festgelegt. Im nächsten Schritt wird die vorliegende Verlaufsweite Vb bestimmt, diese ist gleich der Breite des mittleren Untersuchungsbereiches. Aus den Werten ergibt sich die Kennzahl K_{zVb} gemäß folgender Gleichung 3.8.

$$K_{zVb} = \begin{cases} 0, & \text{wenn } Vb > Vb_{max} \\ Vb \frac{100}{Vb_{opt} - Vb_{min}}, & \text{wenn } Vb \leq Vb_{opt} \\ 100 - (Vb - Vb_{opt}) \frac{100}{Vb_{max} - Vb_{opt}}, & \text{andernfalls} \end{cases} \quad (3.8)$$

Je mehr die aktuelle Verlaufsweite der optimalen Verlaufsweite entspricht, desto größer ist die Annäherung der Kennzahl an den Wert 100.

Bei Betrachtung der Gleichung 3.8 fällt eine Unstimmigkeit auf, wenn der Wert von Vb_{min} größer 0 ist. Dies führt zu einer un stetigen Zuordnung der Verlaufsweite Vb zur Kennzahl. Daher wird diese Gleichung im Konzept (Abschnitt 4.6.1) modifiziert.

3.5.4 Merkmal Kammbreite

Die dritte Kennzahl bildet die Breite des Kammes der Helligkeitsverteilung im Laserlinienquerschnitt auf eine Kennzahl ab. Dazu wird vorab die maximale Kammbreite Kb_{max} (vorgeschlagen wird 20 Pixel), die minimale Kammbreite Kb_{min} (kein Wert vorgegeben) und die optimale Kammbreite Kb_{opt} (vorgeschlagen wird 3 Pixel) manuell festgelegt. Im nächsten Schritt wird die aktuelle Kammbreite Kb bestimmt. Diese ergibt sich aus der Anzahl der Pixel mit ihrer Helligkeit H_{pixel} , bei denen die Bedingung 3.9 gilt. Die Variable ΔH_K be-

zeichnet dabei die Helligkeitsdifferenz für den Kambereich. Vorgeschlagen wird ein Wert von 20.

$$H_{pixel} > H_{max\ aB} - \Delta H_K \quad (3.9)$$

Anschließend wird die Kennzahl für die Kammbreite Kz_{Kb} mit der Gleichung 3.10 berechnet.

$$Kz_{Kb} = \begin{cases} 0, & \text{wenn } Kb > Kb_{max} \\ Kb \frac{100}{Kb_{opt} - Kb_{min}}, & \text{wenn } Kb \leq Kb_{opt} \\ 100 - \sqrt{Kb - Kb_{opt}} \frac{100}{\sqrt{Kb_{max} - Kb_{opt}}}, & \text{andernfalls} \end{cases} \quad (3.10)$$

Die Kennzahl nähert sich dem Maximum 100, je näher die aktuelle Kammbreite an der optimalen Kammbreite liegt.

Ähnlich wie bei der Verlaufsweite ergibt sich eine Unstimmigkeit, wenn der Wert von Kb_{min} größer 0 ist. Dies führt zu einer un stetigen Zuordnung von der Kammbreite Kb zur Kennzahl. Daher wird auch die Gleichung 3.10 im Konzept (Abschnitt 4.6.1) modifiziert.

3.5.5 Merkmal Homogenität

Die vierte Kennzahl bildet die Homogenität der Helligkeitsverteilung auf eine Kennzahl ab. Hier wird davon ausgegangen, dass bei einem Helligkeitsverlauf die Werte monoton bis zum Maximalwert ansteigen, bei Übersteuerung mehrere gleiche Werte folgen und danach die Werte wieder monoton abfallen. Die Anzahl von „Störstellen“ soll die Eignung des Helligkeitsverlaufs für die Messung bestimmen (z. B. Abgrenzung von Sekundärreflektionen).

Zur Ermittlung der Kennzahl führt der Autor eine sogenannte maximale Homogenität Hm_{max} ein, welche manuell festgelegt wird (vorgeschlagen wird 5). Dieser Wert legt die maximal erlaubte Anzahl der Pixel aus dem mittleren Untersuchungsbereich fest, welche den monotonen Helligkeitsverlauf unterbrechen dürfen. Es wird danach die aktuelle Homogenität Hm ermittelt. Ausgehend von dem Pixel mit maximaler Helligkeit wird für jeden Pixel jeweils die Helligkeitsdifferenz zum Nachbarpixel verglichen (Betrachtung nur im mittleren Auswertebereich). Die Anzahl der Unterbrechungen des monoton steigenden/fallenden Helligkeitsverlaufes ergibt den Wert von Hm . Daraus ergibt sich die Kennzahl für die Homogenität Kz_{Hm} aus folgender Gleichung 3.11.

$$Kz_{Hm} = \begin{cases} 0, & \text{wenn } Hm > Hm_{max} \\ 100 - Hm \frac{100}{Hm_{max}}, & \text{andernfalls} \end{cases} \quad (3.11)$$

Es ist hier anzumerken, dass die Bewertung durch das Laserspeckle erheblich gestört werden kann. Daher wird dieses Verfahren entsprechend modifiziert (beschrieben in Abschnitt 4.6.1).

Die Kennzahl ist entsprechend maximal, wenn der monotone Helligkeitsverlauf nicht unterbrochen ist.

3.5.6 Bestimmung der Bildkennzahl

Die Gesamtkennzahl Kz_{Gs} wird aus den gewichteten Einzelkennzahlen anhand der Gleichung 3.12 berechnet.

$$Kz_{Gs} = \frac{F_{\Delta H} Kz_{\Delta H} + F_{Vb} Kz_{Vb} + F_{Kb} Kz_{Kb} + F_{Hm} Kz_{Hm}}{F_{\Delta H} + F_{Vb} + F_{Kb} + F_{Hm}} \quad (3.12)$$

Der Autor gibt keine Werte für die Gewichte $F_{\Delta H}$, F_{Vb} , F_{Kb} , F_{Hm} vor. Er merkt jedoch an, dass ein Faktor kleiner 1 die Bewertung geringer beeinflusst, sowie ein Faktor größer 1 die Bewertung stärker beeinflusst. Betrachtet man den unteren Teil des Bruchs in Gleichung 3.12, so lässt dies eine Normalisierung der Gewichte erkennen. Für die Bestimmung geeigneter Werte kann daher der Bereich der Kennzahlen auf $[0.0, 1.0]$ (und in der Summe 1.0) beschränkt werden, um die Suche zu verkürzen.

Die n Gesamtkennzahlen der einzelnen Laserlinienquerschnitte werden mit der Gleichung 3.13 zu einer Bildkennzahl verrechnet.

$$Kz_{Bild} = \frac{\sum_{i=0}^n Kz_{Gsi}}{n} \quad (3.13)$$

Bei dem beschriebenen Bewertungsverfahren spielen Kantendetektoren keine Rolle, welche z. B. für die Peak Detection in [Teu07] benutzt werden. Soll eine Peak Detection verwendet werden, die besondere Anforderungen an die Flanke der Intensitätsverteilung stellt, so kann dies über eine Gewichtung der Kriterien Verlaufsweite und Kammbreite gesteuert werden.

3.5.7 Bewertung

Mittels der Bildkennzahl soll das am besten geeignete Bild und die dazugehörigen Aufnahmeparameter (Belichtungszeit/Laserintensität) für die weiteren Stufen des Messprozesses ermittelt werden. Dazu werden mehrere Bilder mit unterschiedlichen Werten für die Aufnahmeparameter erzeugt und deren Bildkennzahl bestimmt. Es wird die Einstellung gewählt, deren Bild die höchste Bildkennzahl ergibt.

In der weiteren Arbeit unterscheidet der Autor zwischen absoluter und relativer Bildbewertung. Eine relative Bildbewertung betrachtet nur Bildzeilen/-spalten mit gültigen Helligkeitsverläufen, d. h. geeignete Querschnitte werden ausgewählt. Eine absolute Bildbewertung betrachtet alle Bildzeilen/-spalten. Dies führt zu Fehlbewertungen, wenn sich die Größe der Laserlinie zwischen den Bildaufnahmen stark ändert. Daher ist eine relative Bildbewertung vorzuziehen. Die Bewertung erfolgt unabhängig von der Objektgröße.

Des Weiteren sollten Umgebungsbedingungen beim Messprozess konstant bleiben, insbesondere das Umgebungslicht bei aufeinanderfolgenden Bildaufnahmen, wenn es bezogen auf die Intensität des Lasers einen deutlichen Einfluss auf das Messergebnis hat.

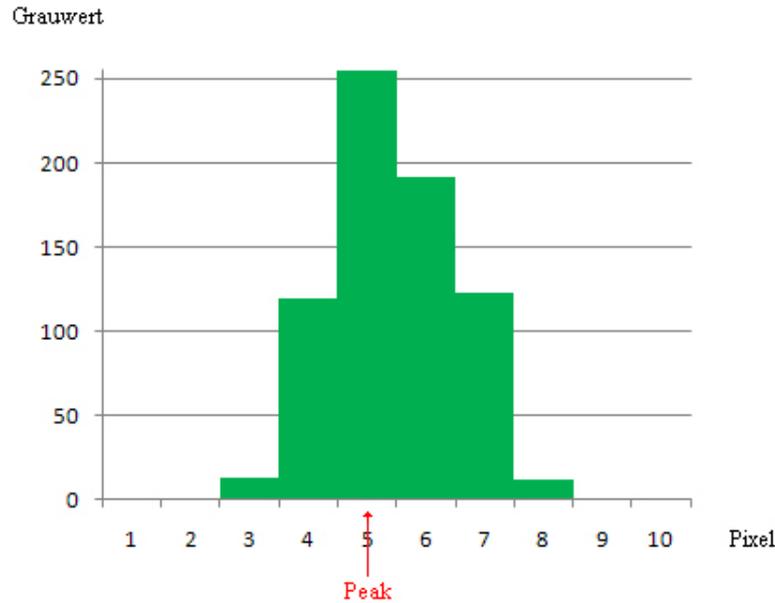
3.6 Peak Detection

Die Peak Detection erfolgt nach der Belichtungsregelung und soll bei der segmentierten Laserlinie in jeder Bildspalte/-zeile die Intensitätsspitze der Laserlinie berechnen. Im Folgenden werden verschiedene Verfahren zur Peak Detection betrachtet, damit die Belichtungsregelung dahingehend entwickelt wird, geeignete Bilder für die weiteren Stufen des Messprozesses zu liefern. Die Peak Detection wird optionaler Teil der Bewertung der Laserlinienqualität.

Bei einem Messsystem ist eine möglichst genaue Bestimmung der Intensitätsspitze im Bild gewünscht, da aufgrund der Projektion eine kleine Messunsi-

cherheit im Bildraum zu einer großen Messunsicherheit der rekonstruierten 3D-Daten führt. Das Bild einer Digitalkamera erzeugt für eine Bildzeile eine gerasterte Intensitätskurve, deren reale Spitze nicht immer eindeutig abgebildet ist. Die in Abbildung 3.12 dargestellte Intensitätskurve besitzt aufgrund der Quantisierung einen maximalen Fehler von der Breite eines halben Pixels.

Abb. 3.12: Digitalisierte Intensitätskurve.



Die Position des Peaks kann im Subpixel-Bereich approximiert werden, wenn eine bestimmte Verteilung der Intensität angenommen wird und über mehrere Pixel integriert wird. In [FN91] und [FN96] werden 5 Verfahren vorgestellt und verglichen. Die Verfahren sind „Gaussian Approximation“, „Center of Mass“, „Linear Interpolation“, „Parabolic Estimator“ und „Blais and Rioux Detector“. Die folgenden Gleichungen in der Tabelle 3.1 der aufgezählten Verfahren sind der Arbeit von [FN96] entnommen. Diese sind vereinfacht anhand von 3 Punkten dargestellt ($f(x)$ beschreibt Pixel mit maximaler Intensität, $f(x-1)$ und $f(x+1)$ beschreiben Nachbarpixel), lassen sich aber auf eine größere Nachbarschaft erweitern.

Tabelle 3.1: Die Tabelle zeigt die 5 Varianten zur Peak Detection. Der ermittelte Wert $\hat{\delta}$ ist der geschätzte Versatz, die geschätzte Peak-Position ergibt sich aus $x + \hat{\delta}$.

Verfahren	Gleichung
Gaussian Approximation	$\hat{\delta} = \frac{1}{2} \left(\frac{\ln(f(x-1)) - \ln(f(x+1))}{\ln(f(x-1)) - 2\ln(f(x)) + \ln(f(x+1))} \right)$
Center of Mass	$\hat{\delta} = \frac{f(x+1) - f(x-1)}{f(x-1) + f(x) + f(x+1)}$
Linear Interpolation	Falls $f(x+1) > f(x-1)$: $\hat{\delta} = \frac{1}{2} \frac{f(x+1) - f(x-1)}{f(x) - f(x-1)}$ Andernfalls: $\hat{\delta} = \frac{1}{2} \frac{f(x+1) - f(x-1)}{f(x) - f(x+1)}$
Parabolic Estimator	$\hat{\delta} = \frac{1}{2} \frac{f(x-1) - f(x+1)}{f(x+1) - 2f(x) + f(x-1)}$
Blais and Rioux Detector	Falls $f(x+1) > f(x-1)$: $\hat{\delta} = \frac{g(x)}{g(x) - g(x+1)}$ Andernfalls: $\hat{\delta} = \frac{g(x-1)}{g(x-1) - g(x)} + 1$ Dabei gilt: $g(x) = f(x-1) + f(x+1)$

In der Arbeit von [FSCP04] wird ein weiteres Verfahren zur Peak Detection vorgestellt. Dieses verwendet einen FIR-Filter zur Approximation des Nulldurchganges der 1. Ableitung der Intensitätswerte. In [FSCP04] (und in [Col04]) wird es mit den 5 vorher genannten Verfahren verglichen.

Das Verfahren bestimmt in einem Fenster (ein Laserlinienquerschnitt) die erste Ableitung der Intensitätswerte. Dazu erfolgt eine Glättung (z. B. Gauß-Filter), um das Laserspeckle zu unterdrücken. Nach [Col04] wird dies mittels eines FIR-Filters berechnet, welcher in Gleichung 3.14 dargestellt ist. Die Gleichung beschreibt die Faltung von $x(n)$ (Intensitätswerte des Laserlinienquerschnitts) und der Funktion $h(n)$ für die Glättung.

$$y(n) = x(n) \cdot h(n) \quad (3.14)$$

In Gleichung 3.15 ist die Ableitung der geglätteten Intensitäten dargestellt.

$$\frac{dy(n)}{dn} = \frac{d[x(n) \cdot h(n)]}{dn} \quad (3.15)$$

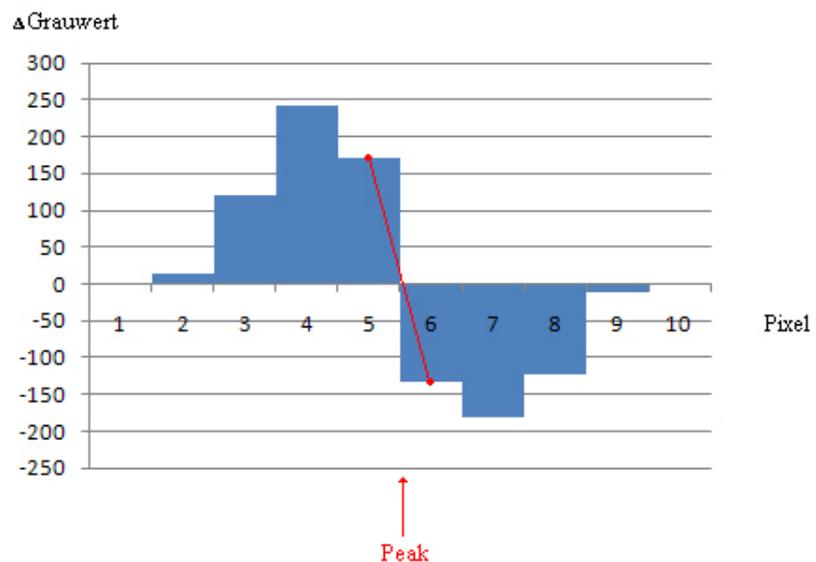
Statt einer Ableitung der, mit einer Glättungsfunktion $h(n)$ geglätteten, Intensitäten der Pixel $x(n)$ wird die Glättungsfunktion $h(n)$ abgeleitet und eine Faltung mit den Intensitäten der Pixel $x(n)$ berechnet. Dies ist möglich, da die Faltung vom abgeleiteten $x(n)$ mit $h(n)$ gleich der Faltung von $x(n)$ mit abgeleiteten $h(n)$ ist. Die Laufzeit der Peak Detection kann somit verringert werden, da die Ableitung $dh(n)$ nur einmal bestimmt werden muss. Bei einer Glättung mit einer Gauß-Funktion ergibt die Ableitung wieder eine Gauß-Funktion. Die folgende Gleichung 3.16 beschreibt die Faltung der Intensitäten der Pixel $x(n)$ und der abgeleiteten Glättungsfunktion $dh(n)$ zur Ermittlung der ersten Ableitung der Intensitäten $dy(n)$.

$$\frac{dy(n)}{dn} = x(n) \cdot \frac{dh(n)}{dn} \quad (3.16)$$

In dem berechneten Vektor der Anstiege wird der erste negative Wert gesucht. An dieser Stelle liegt die Position x_0 . Davor liegt die Position x_1 . Der Peak ergibt sich aus dem Nulldurchgang der Geraden zwischen beiden Punkten (Gleichung 3.17). Dies veranschaulicht die Abbildung 3.13.

$$\hat{\delta} = x_0 - \frac{y_0(x_1 - x_0)}{y_1 - y_0} \quad (3.17)$$

Abb. 3.13: Ergebnis der abgeleiteten Intensitätskurve aus Abbildung 3.12. Die geschätzte Position des Peaks ergibt sich aus dem Nulldurchgang der Geraden zwischen ersten negativen Wert und den Wert davor.



In [Col04] zeigt sich das Verfahren basierend auf dem FIR-Filter nach einer praktischen Evaluierung mit den Verfahren aus [FN96] als bessere Wahl für

den Einsatz zur Peak Detection. Die Bestimmung der Intensitätsspitze anhand zweier Punkte ähnelt dem Verfahren in [Teu07]. Der Vorteil bei dem Verfahren basierend auf dem FIR-Filter ist die Verwendung der Glättungsfunktion, welche das Laserspeckle unterdrückt. Da dieses Verfahren eine bessere Wahl für die Peak Detection ist, soll die zu entwickelnde Belichtungsregelung darauf optimiert werden. Dies bedeutet, dass eine optimale Abbildung einen hohen Kontrast, möglichst kleine Plateaus und eine gewisse Verlaufsbreite bei der Intensitätsverteilung in den Querschnitten besitzt.

3.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden weitere Strategien zur Belichtungsregelung vorgestellt. Zunächst wurden Ansätze für die Kamera betrachtet. Bei den Software-Ansätzen ist besonders die Verwendung eines Histogrammes interessant. Der Ansatz eignet sich für die zu entwickelnde Belichtungsregelung. Ein Histogramm bietet die Möglichkeit, eine Abbildung der Laserlinie sehr schnell zu bewerten (z. B. lässt die Verteilung der Grauwerte im unteren Bereich auf eine unterbelichtete Laserlinie schließen). Es wurde weiter geschlossen, dass für eine detaillierte Bewertung der Laserlinie, diese zunächst segmentiert werden muss. Anschließend wurden Hardware-Ansätze zur Belichtungsregelung betrachtet. Besonders interessant ist hier der Ansatz der HDR-Kamera zur Reduktion von Überbelichtung. Jedoch sind solche Lösungen für ein kostengünstiges Messsystem ungeeignet. Im nächsten Abschnitt wurden spezielle Lösungen für Messsysteme mit Laser betrachtet. Es wurde festgestellt, dass es in der Literatur an Lösungen mangelt, die ein automatisches Regelungskonzept für den Laserlichtschnitt (mit Linienlaser) beschreiben. Um die Qualität der Laserlinie begutachten zu können, wurde im nächsten Abschnitt die Segmentierung der Laserlinie als Vorstufe der Qualitätsbewertung betrachtet. Diese erfolgt anhand des Snake-Verfahrens, aufgrund der in der Vorarbeit [Fut11] festgestellten Eignung des Verfahrens. Im anschließenden Abschnitt wurde aus einer unveröffentlichten Arbeit [Sch04] ein Verfahren zur Bewertung der Qualität der Laserlinie vorgestellt. Dieses bewertet Merkmale der Laserlinie mit Kennzahlen und wird in dieser Arbeit umgesetzt und evaluiert. Im darauffolgenden Abschnitt wurde die Extraktion der Konturpunkte (Peak Detection) beschrieben. Diese ist die nächste Stufe nach Aufnahme einer geeigneten Abbildung der Laserlinie. Ziel der zu entwickelnden Belichtungsregelung ist es, dass sie diejenige Belichtungszeit wählt, bei der möglichst viel Informationen in den jeweiligen Bildaufnahmen für die Extraktion der Profillinie vorhanden sind.

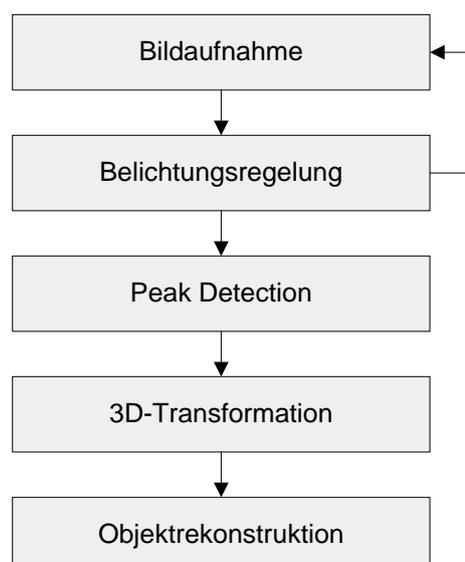
Im nächsten Kapitel wird das Konzept für die automatische Belichtungsregelung für den Laserlichtschnitt entwickelt und vorgestellt.

Dieses Kapitel entwickelt und beschreibt das Konzept für die automatische Belichtungsregelung. Im ersten Schritt wird die Belichtungsregelung in den Ablauf des Messprozesses eingeordnet. Der nächste Abschnitt gibt einen Überblick über die Schritte zur Bewertung einer Bildaufnahme. In den darauffolgenden Abschnitten werden die einzelnen Schritte jeweils näher erläutert. Diese beinhalten Verfahren zur Bewertung der Qualität einer Bildaufnahme. Für eine automatische Belichtungsregelung müssen geeignete Werte für die Qualitätsbewertung ermittelt werden. Dazu wird eine Methode in einem weiteren Abschnitt beschrieben. Abschließend wird der Ablauf der Belichtungsregelung vor und während des Messprozesses betrachtet.

4.1 Belichtungsregelung im Messprozess

Die Regelung der Belichtung ist eine wichtige Teilaufgabe im Messprozess. Eine Einordnung in den Messprozess zeigt die folgende Abbildung 4.1.

Abb. 4.1: Schematische Darstellung der Stufen des Messprozesses. Basierend auf Bildaufnahmen wird die Belichtung geregelt. Bei geeigneter Abbildung der Laserlinie werden die Konturpunkte mittels Peak Detection extrahiert. Diese werden im nächsten Schritt in 3D-Punkte transformiert. Anhand derer wird das Messobjekt rekonstruiert.



Der erste Schritt im Messprozess ist die Bildaufnahme. Basierend auf der Qualität der Laserlinie im Bild erfolgt eine Regelung der Belichtung. Die Belichtungsregelung kann eine erneute Bildaufnahme veranlassen. Eine Regelung soll die Qualität der Laserlinie näherungsweise am Optimum halten. Nach Aufnahme einer geeigneten Laserlinie erfolgt die Peak Detection. Diese liefert Punkte von Intensitätsspitzen entlang der Laserlinie. Die ermittelten 2D-Punkte werden im nächsten Schritt in 3D-Punkte transformiert. Aus den 3D-Punkten mehrerer Bilder wird dann die 3D-Oberfläche des Messobjektes rekonstruiert.

Eine weitere Möglichkeit zur Belichtungsregelung ist die Verwendung von Informationen aus den erzeugten 3D-Punktewolken (z. B. Komplettheit der Daten). Diese Strategie besitzt durch die Komplexität einen deutlich höheren Laufzeitaufwand und wird daher in dieser Arbeit nicht verwendet.

4.2 Stufen der Belichtungsregelung

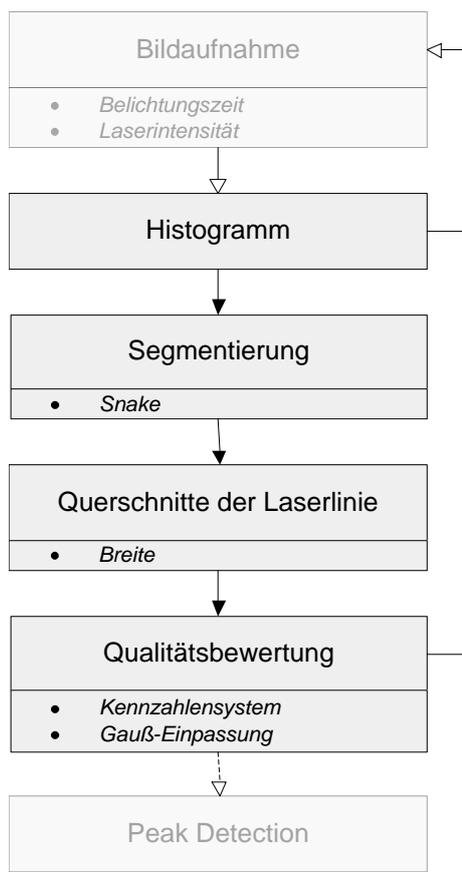
Zunächst findet vor der Belichtungsregelung die Bildaufnahme statt. Um die Laufzeit der Regelung zu verkürzen, kann (falls möglich) vorab manuell eine Konfiguration (Belichtungszeit, Laserintensität, ...) ermittelt werden, die sehr wahrscheinlich nicht zu einem Dunkelbild bei der ersten Aufnahme (komplett schwarzes Bild ohne eine auswertbare Profillinie) führt.

Die Belichtungsregelung wird als mehrstufiges System konzipiert. Einzelne Stufen bewerten die Qualität der Abbildung und können eine erneute Bildaufnahme auslösen. Dabei wird die Konfiguration (z. B. Anweisung, die Belichtungszeit zu verdoppeln) von der jeweiligen Stufe ermittelt. Die einzelnen Stufen sind aufsteigend nach ihrer Komplexität sortiert.

Als erste Stufe zur Bewertung der Laserlinienabbildung wird das Histogramm aus Abschnitt 3.1 gewählt. Dieses Verfahren ermöglicht eine Betrachtung der Intensitätsverteilung und kann sehr schnell ungeeignete Bilder verwerfen (z. B. falls alle Grauwerte < 50 sind). Aufgrund der Verteilung der Grauwerte kann eine erneute Bildaufnahme veranlasst werden, bis die Abbildung nicht mehr in dieser Stufe verworfen wird. In Abschnitt 3.1 wurde des Weiteren festgestellt, dass das Histogramm lediglich lokale Pixeldaten betrachtet. Daher wird in der nächsten Stufe die Laserlinie segmentiert, um deren Qualität genauer bestimmen zu können. Dazu wird das Snake-Verfahren aus Abschnitt 3.4 (aufgrund der Eignung [Fut11]) verwendet. Nach der Segmentierung werden in der nächsten Stufe die Querschnitte der Laserlinie extrahiert. Deren Qualität wird in der nächsten Stufe bewertet. Es werden die Querschnitte bewertet, da nach der Belichtungsregelung in diesen die Peak Detection erfolgt und die Belichtungsregelung dafür ein geeignetes Bild ermöglichen soll. Zur Qualitätsbewertung der Querschnitte werden in dieser Arbeit zwei Verfahren näher betrachtet. Dies ist das Verfahren basierend auf Kennzahlen (Abschnitt 3.5) und ein neuer Ansatz mittels Gauß-Einpassung (wird im Folgenden vorgestellt). Aufgrund der ermittelten Qualität kann auch diese Stufe eine erneute Bildaufnahme veranlassen. Wurde eine optimale Abbildung der Laserlinie ermittelt, so wird das Bild an die nächste Stufe des Messprozesses (Peak Detection) übergeben. Die folgende Abbildung 4.2 veranschaulicht die einzelnen Stufen der Belichtungsregelung und den Prozessablauf. Im dargestellten Prozessablauf erfolgt die Peak Detection nach der Regelung. Die Peak Detection kann

jedoch auch Teil eines Qualitätsbewertungsverfahrens der Laserlinie werden (wird im Folgenden vorgestellt).

Abb. 4.2: Überblick über die einzelnen Stufen der Belichtungsregelung. Vor Beginn der Regelung wird eine Bildaufnahme erzeugt. Das daraus abgeleitete Histogramm ist der erste Teil der Belichtungsregelung und die erste Bewertung der Laserlinienabbildung. Diese Stufe kann eine erneute Bildaufnahme veranlassen, bis ein Bild nicht mehr verworfen wird. Ist ein Bild akzeptiert, so wird im nächsten Schritt die Laserlinie segmentiert. Danach werden die Querschnitte der Laserlinie extrahiert. Deren Qualität wird im nächsten Schritt bewertet. Aufgrund der ermittelten Qualität kann eine erneute Bildaufnahme veranlasst werden. Ist eine optimale Abbildung ermittelt worden, so ist die Belichtungsregelung abgeschlossen. Die Bildaufnahme wird an die nächste Stufe übergeben (Peak Detection).



Die einzelnen Stufen der Belichtungsregelung werden jeweils in den folgenden Abschnitten näher betrachtet/entwickelt.

4.3 Histogramm

Diese Stufe betrachtet die Intensitätsverteilung und ermöglicht ein schnelles Verwerfen von ungeeigneten Bildern. Dies sind stark unterbelichtete und stark überbelichtete Bilder. Folgende Fälle werden unterschieden:

1. Falls der maximale Grauwert gleich 0 [0, 255] ist, so wird eine Fehlermeldung ausgegeben (komplett schwarzes Bild weist auf Fehler im Messsystem hin).
2. Wenn der maximale Grauwert $Grau_{max}$ in [1, 254] ist, dann gilt die Aufnahme als unterbelichtet. Es wird die Aufnahme eines neuen Bildes veranlasst. Dabei wird eine neue Belichtungszeit verwendet, die anhand der Gleichung 4.1 bestimmt wird.

$$Belichtungszeit_{neu} = Belichtungszeit_{alt} \cdot \frac{255}{Grau_{max}} \quad (4.1)$$

3. Falls mehr als 25 Prozent aller Pixel den Wert 255 haben, dann gilt die Aufnahme als überbelichtet. Es wird die Aufnahme eines neuen Bildes

veranlasst. Dazu wird die Anzahl aller weißen Pixel AP_{Weiss} und die Anzahl aller Bildpixel AP_{Bild} berechnet. Die neue Belichtungszeit ergibt sich anhand der Gleichung 4.2.

$$Belichtungszeit_{neu} = Belichtungszeit_{alt} \cdot \frac{AP_{Bild} - AP_{Weiss}}{AP_{Bild}} \quad (4.2)$$

Der 2. Fall ist problematisch bei einer Punktstörung, z. B. bei Auftreten eines defekten Sensorelementes (CCD-Chip), welches unabhängig von der Bildaufnahme einen hohen Grauwert liefert. Um den Einfluss von Punktstörungen zu minimieren, werden nach der Berechnung des Histogramms eine bestimmte Anzahl von Pixeln (z. B. 3) mit maximalen Grauwert aus dem Bild dem Intensitätswert 0 im Histogramm zugeordnet. Dies verhindert, dass ein Ausreißer einen entscheidenden Einfluss auf die Bestimmung der neuen Belichtungszeit hat.

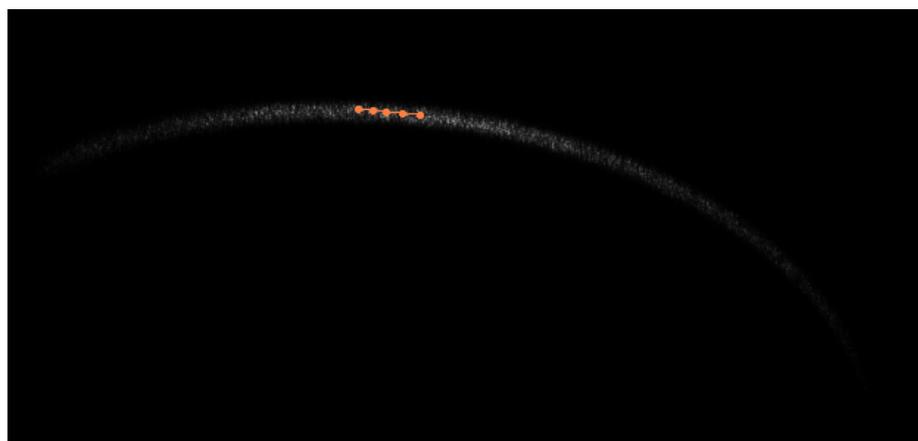
Die Anzahl der neuen Bildaufnahmen ist begrenzt, um mögliche Schleifen zu verhindern. Es ist hier anzumerken, dass z. B. eine Verdoppelung der Belichtungszeit nicht automatisch zu einer Verdoppelung des maximalen Grauwertes führen muss. Für eine detailliertere Bewertung der Bildaufnahme muss die Laserlinie zunächst segmentiert werden, um ihre Qualität zu bewerten.

4.4 Segmentierung

Die Segmentierung der Laserlinie erfolgt anhand des, in den Grundlagen beschriebenen, Snake-Verfahrens. Des Weiteren werden die im Folgenden beschriebenen Erweiterungen umgesetzt.

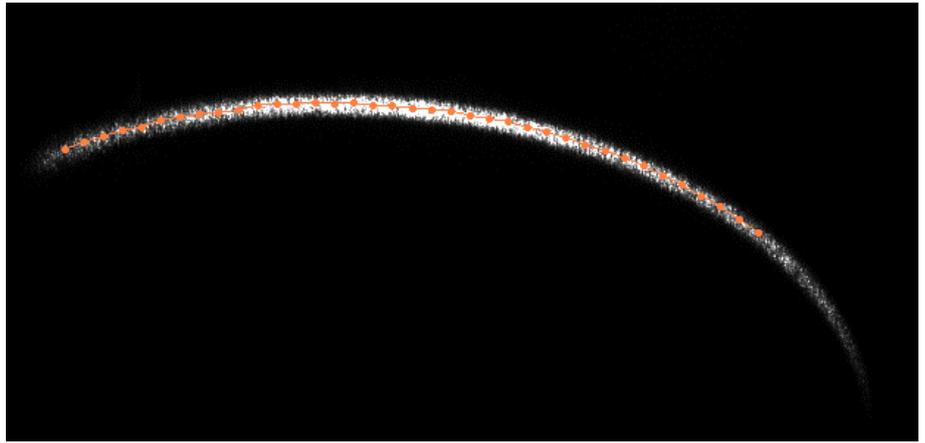
Die in [Fut11] beschriebene Implementierung des Segmentierungsverfahrens mittels Snake nutzt einen manuellen Schwellwert (Trennung von Laserlinie und Hintergrund) für die Modellgenerierung. Dies kann bei unterbelichteten Bildern zu einer schlechten Modellgenerierung führen. Die folgende Abbildung 4.3 zeigt dies im Vergleich mit Abbildung 4.4.

Abb. 4.3: Die hier abgebildete Segmentierung nutzt einen manuellen, fixen Intensitätsschwellwert für die Modellgenerierung. Nur ein kleiner Teil der unterbelichteten Laserlinie wird mit dem Linienmodell segmentiert.



4.4 Segmentierung

Abb. 4.4: Die Abbildung zeigt die Modellgenerierung an der Aufnahme der gleichen Kugel mit höherer Belichtungszeit. Ein deutlich größeres Linienmodell ermöglicht es, einen größeren Teil der Laserlinie zu segmentieren.

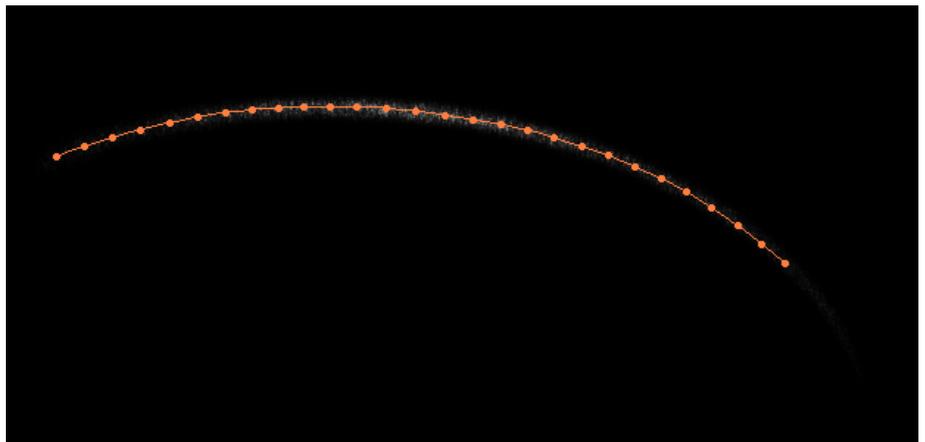


Zur Verbesserung wird der Schwellwert, basierend auf einem Histogramm, verändert. Dazu werden zunächst der Schwarz- und der Weißwert berechnet, indem 0,6 Prozent der Werte vom unteren und oberen Teil des Histogramms abgeschnitten werden. Der neue Intensitätsschwellwert Int_{neu} ergibt sich aus dem manuellen Intensitätsschwellwert $Int_{manuell}$ und dem neuen Schwarz- und Weißwert (siehe Gleichung 4.3).

$$Int_{neu} = Int_{manuell} \cdot (Weißwert - Schwarzwert) + Schwarzwert \quad (4.3)$$

Diese Methode verändert den Schwellwert sehr gering bei überbelichteten Bildern und sehr stark bei unterbelichteten Bildern. Das Verfahren soll bei unterbelichteten Bildern einen größeren Linienabschnitt segmentieren, sowie vergleichbar große Linienmodelle erzeugen, um den Qualitätsbewertungsbereich konstant zu halten und die Bewertung robust zu gestalten. Die in Abbildung 4.5 dargestellte Segmentierung der Laserlinie von Abbildung 4.3 benutzt den dynamisch ermittelten Schwellwert für die Modellgenerierung und segmentiert einen deutlich größeren Teil der Laserlinie.

Abb. 4.5: Verbesserte Segmentierung der unterbelichteten Aufnahme einer Kugel (Abbildung 4.3) durch dynamischen Intensitätsschwellwert.



Statt einer histogrammbasierten Veränderung des manuellen Schwellwertes ist auch eine histogrammbasierte Veränderung des Bildes möglich. Dies ermöglicht eine Beschleunigung des Segmentierungsprozesses (Intensitätskräfte an den Kontrollpunkten des Linienmodells werden deutlich verstärkt), jedoch ist das Skalieren und das damit verbundene Abschneiden der Intensitätswerte

auch automatisch ein Verlust von (möglicherweise relevanten) Informationen. Daher wird diese Methode hier nicht gewählt.

Ist der ermittelte Intensitätsschwellwert Int_{neu} deutlich kleiner als der vorgegebene Wert $Int_{manuell}$ (aufgrund eines stark unterbelichteten Bildes), so ist eine Trennung von Laserlinie und Hintergrund problematisch, da z. B. Bildrauschen an Bedeutung gewinnt. Jedoch werden solche Bilder bereits in der vorherigen Stufe der Belichtungsregelung verworfen.

Der Intensitätssensor des Snake-Modells wird nach der Arbeit [Fut11] um folgende Optimierung erweitert, um die Laufzeit des Segmentierungsprozesses zu verkürzen. In der Arbeit wird ein Intensitätssensor beschrieben, der einen Gauß-Filter mit fester Kernel-Größe zur lokalen Glättung der Intensitäten benutzt. Aufgrund der Charakteristik des Verlaufs der Gauß-Verteilung eignet sich diese Glättungsfunktion für den Intensitätssensor. Der Gauß-Filter glättet das Laserspeckle und definiert anhand der Größe der Kernel-Matrix die Sensorreichweite. Nach der Glättung ergibt sich die Krafrichtung des Intensitätssensors aus dem Intensitätsgradienten, daher haben die vom Sensor weiter entfernten Pixel mit steigender Größe der Kernel-Matrix einen zunehmenden Einfluss. Für eine Verbesserung der Laufzeit werden mehrere Stufen mit unterschiedlicher Kernel-Größe eingeführt. Diese Kernel-Karte wird vorab berechnet und eine Referenz an jeden Sensor übergeben. Der Sensor wählt für eine Glättung einen Kernel, basierend auf der unterliegenden Intensität, aus. Befindet sich der Sensor über einen schwarzen Pixel, so wird ein großer Kernel gewählt. Dies ermöglicht die Betrachtung einer großen Nachbarschaft, falls der Kontrollpunkt nicht auf der Laserlinie ist. Je heller der Pixel unter dem Sensor ist, desto kleiner kann der Kernel gewählt werden, da der Sensor sich bereits auf der Laserlinie befindet. Dabei darf die Größe des kleinsten Kernels einen bestimmten Schwellwert (z. B. Kernel-Breite 11) nicht unterschreiten, da die verrauschte Laserlinie geglättet werden soll. Neben der Verkürzung der Laufzeit verringert diese Methode auch die Verkürzung des Linienmodells nach der Segmentierung (in [Fut11] angemerkt), da die Kernel-Breite die Position des ersten und letzten Sensors am Linienanfang bzw. -ende beeinflusst. Dieses Verfahren ähnelt der Strategie des dynamischen, kreis-basierten Intensitätssensors in [SF11].

Eine weitere Optimierung ist die Verteilung des Segmentierungsprozesses auf mehrere Prozessorkerne. Hierbei werden folgende Möglichkeiten umgesetzt und verglichen:

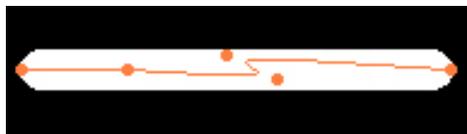
1. Glättung der Pixel auf mehrere Kerne verteilen.
2. Kontrollpunkte des Linienmodells auf mehrere Kerne verteilen (d. h. bei einem Zweikernsystem berechnet jeder Kern die Kräfte jeweils für eine Hälfte des Linienmodells).
3. Der erste Kern berechnet, wie im ursprünglichen Ansatz, die Segmentierung und die restlichen n Kerne bieten eine optionale Entlastung. Dazu berechnen die restlichen Kerne unabhängig die Einträge der globalen Kräftekarte (Beschreibung des Kartenansatzes in [Fut11]), basierend auf den aktuellen Positionen der Kontrollpunkte. Während der erste Kern z. B. die inneren Kräfte des Linienmodells berechnet, berechnen die restlichen Kerne die Einträge der Kräftekarte in der Umgebung der jeweiligen Kontrollpunkte. Diese 'Force Map Prediction' benötigt wäh-

rend des Segmentierungsprozesses keine zeitaufwändige Synchronisierung der Daten zwischen den Kernen.

Es werden alle 3 Möglichkeiten implementiert und im Abschnitt 6.1.1 verglichen.

Ein weiterer Aspekt ist das Feedback für den Nutzer bei nicht optimaler Segmentierung der Laserlinie. Wenn 2 Kontrollpunkte ihre Position während des Segmentierungsprozesses tauschen, so bildet sich eine nicht gewünschte Zick-Zack-Linie (siehe Abbildung 4.6). Bei Bewertung der Qualität anhand der Laserlinienquerschnitte (Pixel entlang der Normalen der Punkte des Linienmodells, siehe folgenden Abschnitt 4.5) kann eine Verfälschung des Ergebnisses auftreten. Dies wird detektiert, indem für jeden Kontrollpunkt (außer den ersten und den letzten) der Winkel zwischen den Richtungsvektoren zu den beiden benachbarten Kontrollpunkten bestimmt wird. Ist dieser kleiner 90 Grad, so wird eine Warnmeldung ausgegeben, dass die Qualitätsbewertung möglicherweise nicht zuverlässig ist.

Abb. 4.6: Schematische Darstellung einer ungültigen Segmentierung anhand einer synthetischen Laserlinie.



Die Segmentierung der Laserlinie liefert eine Menge von Kontrollpunkten des Linienmodells. Für die anschließende Qualitätsbewertung der Laserlinie müssen diese interpoliert werden, da nicht jeder Bildzeile bzw. -spalte ein Kontrollpunkt zugeordnet ist. Zur Interpolation der n Kontrollpunkte eignet sich ein B-Spline [BH94]. Das Linienmodell der Snake wird mittels eines B-Splines mit 3. Ordnung ($p = 3$) in einen Vektor von Linienpunkten überführt (siehe Gleichung 4.4). Dabei kann anhand des globalen Parameters u [0.0, 1.0] die Anzahl der zu erzeugenden Linienpunkte LP gesteuert werden (die Anzahl ergibt sich aus der Länge des Linienmodells in Pixeln). Die Variable C bezeichnet die Kontrollpunkte des Linienmodells und die Variable N die Basisfunktionen des B-Splines.

$$LP(u) = \sum_{i=1}^{n-p} C_i N_i(u) \quad (4.4)$$

Dieses Verfahren erzeugt kontinuierlich Punkte entlang der Laserlinie. Basierend auf dieser 2D-Kontur soll die Qualität der Laserlinie bewertet werden. Dazu werden in der nächsten Stufe die Querschnitte extrahiert.

4.5 Querschnitte der Laserlinie

Für die Auswertung der Qualität der Laserlinie wird der auszuwertende Bereich ermittelt. Eine schnelle Möglichkeit bietet das im Abschnitt 3.5 vorgestellte Verfahren, bei dem ein Untersuchungsbereich entlang einer Bildzeile/-spalte geschoben wird und der Untersuchungsbereich mit maximaler Intensitätsdifferenz (mittlerer Teilbereich gegenüber Randbereich) für die Bewertung gewählt wird. Dieses Verfahren wird jedoch gestört, wenn z. B. Sekundärreflexionen mit höherer Intensitätsdifferenz als bei der Primärreflektion abgebildet sind. Die Segmentierung mittels Snake-Modell ermöglicht eine robuste Segmentierung der Primärreflektion. Daher wird der Untersuchungsbe-
reich/Laserlinienquerschnitt anhand des Linienmodells der Snake ermittelt.

Die Laserlinienquerschnitte ergeben sich anhand der Normalen des Linienmodells. Die Bewertung berücksichtigt damit auch die Linienform gegenüber der zeilen-/spaltenweisen Bewertung aus Abschnitt 3.5. Zur Ermittlung der Normalen wird für jeden Linienpunkt zunächst der Richtungsvektor $N(x,y)$ zum jeweils nächsten Linienpunkt ermittelt. Die Normale LPN an einem Linienpunkt ergibt sich anhand der Gleichungen in 4.5 und 4.6.

$$LPN_x = \frac{-y}{|N|} \quad (4.5)$$

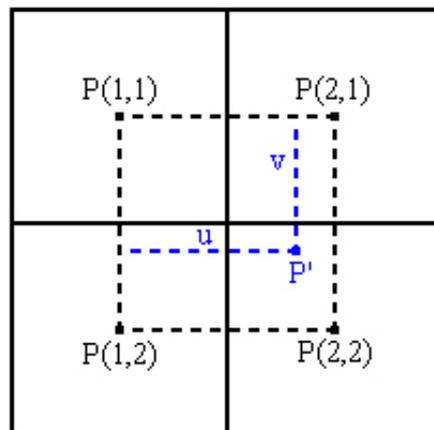
$$LPN_y = \frac{x}{|N|} \quad (4.6)$$

Entlang der Normalen werden die Pixelintensitäten des Laserlinienquerschnitts bestimmt. Die Breite des Querschnitts legt ein manuell gewählter Wert fest (z. B. 30 Pixel). Da die Positionen der Linienpunkte Fließkommawerte sind (und nicht den diskreten Pixelpositionen entsprechen), werden die einzelnen Pixelwerte des Querschnitts jeweils durch bilineare Interpolation der benachbarten 4 Pixel bestimmt (siehe Gleichung 4.7).

$$P'(x,y) = (P(1,1) \cdot (1.0 - u) + P(2,1) \cdot u) \cdot (1.0 - v) + (P(1,2) \cdot (1.0 - u) + P(2,2) \cdot u) \cdot v \quad (4.7)$$

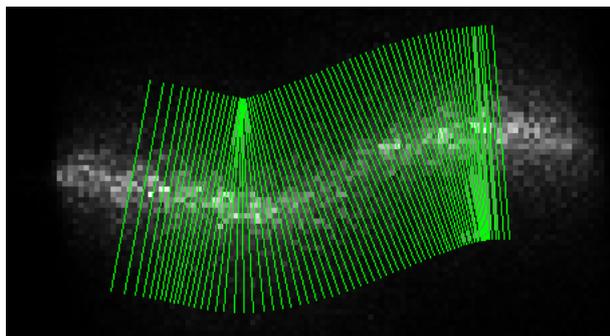
Die Abbildung 4.7 zeigt die Positionen der 4 zu interpolierenden Pixel.

Abb. 4.7: Darstellung der Lage der in Gleichung 4.7 verwendeten 4 Pixel für die bilineare Interpolation.



Eine weitere mögliche Strategie ist die Nearest-Neighbor-Heuristik. Hier entspricht die Intensität dem naheliegenden Pixel (Abtastposition wird ganzzahlig gerundet). Dieses Verfahren ist schneller, jedoch werden für die Ermittlung des Laserlinienquerschnitts einige Pixel doppelt oder gar nicht betrachtet (je nach Normale). Bei einer bikubischen Interpolation werden 16 umliegende Pixel betrachtet. Dieses Verfahren wird häufig in der Bildverarbeitung beim Herunterskalieren von Bildern verwendet. Es ermöglicht ein etwas schärferes Bild (gegenüber bilinearer Interpolation), ist jedoch deutlich langsamer. Für die Implementierung wird das Verfahren der bilinearen Interpolation verwendet, da es ein ausgewogenes Verhältnis von Qualität und Laufzeit besitzt.

Abb. 4.8: Beispiel von ermittelten Querschnitten (grün), deren Qualität bewertet werden soll.



Nach Ermittlung der Laserlinienquerschnitte (Beispielabbildung 4.8) kann die Qualität der Laserlinie bewertet werden.

4.6 Qualitätsbewertung der Laserlinie

Nach Ermittlung der Querschnitte der Laserlinie soll deren Qualität bewertet werden. In Abschnitt 3.5 wurde ein Verfahren nach Schachner [Sch04] mit Kennzahlen zur Bewertung vorgestellt. Laserlinienmerkmale werden einer Kennzahl $[0, 100]$ zugeordnet und zu einer Gesamtkennzahl verrechnet. Andere Möglichkeiten wären die Verwendung von einem Ampelsystem, einem Prozentsystem, einem Regelsystem basierend auf Fuzzylogik oder Ähnlichem. Die Basis all dieser Verfahren ist letztendlich ein mehr oder weniger komplexes Polynom. Das Kennzahlensystem bietet ein nachvollziehbares System für den Anwender, daher wird dieses in der weiteren Arbeit verwendet und die im folgenden Abschnitt 4.6.1 beschriebenen Erweiterungen hinzugefügt. Anschließend wird in Abschnitt 4.6.2 ein zweites (neues) Verfahren zur Qualitätsbewertung vorgestellt, welches eine andere Strategie benutzt. Beide Qualitätsbewertungsverfahren werden in dieser Arbeit umgesetzt und verglichen.

Die zwei Qualitätsbewertungsverfahren nutzen die Querschnitte der Laserlinie. Vor Einsatz des jeweiligen Bewertungsverfahrens wird die Anzahl definitiv überbelichteter Querschnitte bestimmt. Findet sich in mehr als 75% der Querschnitte ein großes Plateau (z. B. mehr als 4 nebeneinanderliegende Pixel mit maximalen Grauwert), so wird keine komplexere Bewertung der Laserlinie vorgenommen und eine Halbierung der Belichtungszeit angewiesen. Wenn ein Bild akzeptiert wird, dann erfolgt eine Bewertung mit einem der beiden folgenden Verfahren.

4.6.1 Bewertung mit Kennzahlen

Das in Abschnitt 3.5 vorgestellte Bewertungsverfahren wird wie folgt modifiziert.

In Abschnitt 3.5.3 wurde auf eine unstetige Zuordnung der Verlaufsweite zu einer Kennzahl hingewiesen, wenn die minimale Verlaufsweite $V_{b_{min}}$ größer 0 ist. Um eine stetige Zuordnung herzustellen, wird Gleichung 3.8 zu folgender Gleichung 4.8 geändert.

$$Kz_{Vb} = \begin{cases} 0, & \text{wenn } Vb \leq Vb_{min} \text{ oder} \\ & Vb > Vb_{max} \\ (Vb - Vb_{min}) \frac{100}{Vb_{opt} - Vb_{min}}, & \text{wenn } Vb \leq Vb_{opt} \\ 100 - (Vb - Vb_{opt}) \frac{100}{Vb_{max} - Vb_{opt}}, & \text{andernfalls} \end{cases} \quad (4.8)$$

Dies wird äquivalent für das Merkmal Kammbreite umgesetzt. Die Gleichung 3.10 wird zu folgender Gleichung 4.9 geändert.

$$Kz_{Kb} = \begin{cases} 0, & \text{wenn } Kb \leq Kb_{min} \text{ oder} \\ & Kb > Kb_{max} \\ (Kb - Kb_{min}) \frac{100}{Kb_{opt} - Kb_{min}}, & \text{wenn } Kb \leq Kb_{opt} \\ 100 - \sqrt{Kb - Kb_{opt}} \frac{100}{\sqrt{Kb_{max} - Kb_{opt}}}, & \text{andernfalls} \end{cases} \quad (4.9)$$

Des Weiteren wird die Merkmalsbewertung der Homogenität erweitert. Eine prototypische Implementierung zeigt, dass die Bewertung erheblich vom Bildrauschen (Speckle) gestört wird. Dies führt fast immer zu einer Bewertung des Merkmals mit 0. Um diese Merkmalsbewertung nutzbarer zu gestalten, wird die Möglichkeit implementiert, vor der Bewertung den Helligkeitsverlauf mittels eines Gauß-Filters mit kleiner Kernel-Breite zu glätten.

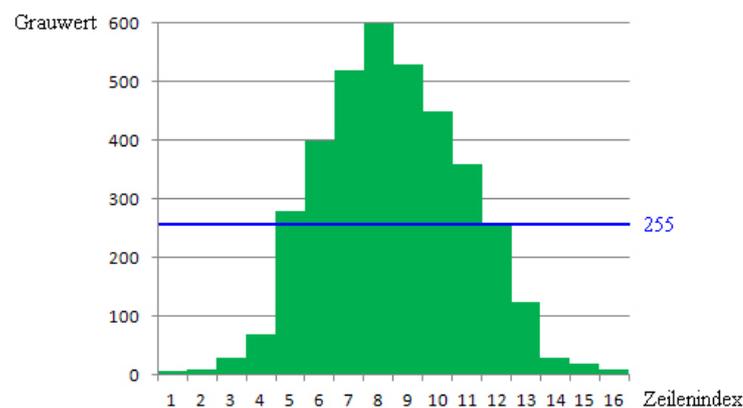
Die Bestimmung geeigneter Werte für die einzelnen Parameter (Vb_{opt} , Kb_{opt} , etc.) wird in Abschnitt 4.7 betrachtet. Der folgende Abschnitt 4.6.2 beschreibt einen zweiten Ansatz für die Qualitätsbewertung.

4.6.2 Bewertung mittels Gauß-Einpassung

Bei diesem Verfahren wird die optimal abgebildete Laserlinie geschätzt und mit der Bildaufnahme verglichen. Dies geschieht in mehreren Schritten.

Im ersten Schritt werden aus den vorhandenen Laserlinienquerschnitten (Abschnitt 4.5) geeignete Querschnitte für die Schätzung der optimalen Abbildung ausgewählt. Dazu muss eine bestimmte Anzahl von Intensitätswerten (z. B. 3) größer als ein Schwellwert (z. B. 64) sein. Des Weiteren werden Querschnitte verworfen, wenn sie ein zu großes Plateau mit dem maximalen Grauwert (255) besitzen. Das im Folgenden beschriebene Bewertungsverfahren benötigt eine robuste Erkennung der Wendepunkte der Intensitätsverteilung. Ist ein Plateau zu groß, so können die Wendepunkte verschwinden (siehe Abbildung 4.9).

Abb. 4.9: Schematische Darstellung eines übersteuerten Querschnitts. Die realen Wendepunkte der Intensitätsverteilung verschwinden mit zunehmender Übersteuerung. Diese Information wird im Bild abgeschnitten.



Ein übersteuerter Querschnitt soll für die Schätzung der idealen Laserlinie nicht verwendet werden. Ist ein Plateau mit dem maximalen Grauwert zu lang (z. B. ≥ 5 Pixel), so wird der Querschnitt nicht zur Schätzung der Wendepunkte benutzt. Die Menge geeigneter Querschnitte ergibt die Schätzerquerschnitte $\vec{S}Q_k$.

Der zweite Schritt bestimmt in den jeweiligen Schätzerquerschnitten $\vec{S}Q_k$ die Position des Peaks $peak_k$ der Laserlinie anhand des Verfahrens basierend auf dem FIR-Filter (Abschnitt 3.6). Ist der Peak zu weit am Rand des Schätzerquerschnitts, so wird dieser Querschnitt aus der Menge der Schätzerquerschnitte entfernt.

Im dritten Schritt wird an den jeweiligen Schätzerquerschnitten $\vec{S}Q_k$ die Standardabweichung der Intensitätsverteilung σ_{SQ} im Laserlinienquerschnitt geschätzt. Dazu wird die Position des Maximums I_{max} und des Minimums I_{min} der ersten Ableitung der geglätteten Bildfunktion (Gauß-Filter, wie in dem Verfahren basierend auf dem FIR-Filter) bestimmt. Die Distanz vom Peak zum jeweiligen Extrempunkt ergibt die geschätzte Standardabweichung. Die folgende Gleichung 4.10 beschreibt die Schätzung.

$$\sigma_{SQ} = \frac{(|I_{min} - peak|) + (|I_{max} - peak|)}{2} = \frac{|I_{min} - I_{max}|}{2} \quad (4.10)$$

Für jeden Schätzerquerschnitt ergibt sich jeweils eine Standardabweichung σ_{SQ} . Der Median der Werte ergibt die geschätzte Standardabweichung $\sigma_{Schätzung}$ für die komplette Laserlinie. Der Median wird statt des Mittelwertes verwendet, da er sich bei Ausreißern robuster verhält.

Im vierten Schritt wird eine 1D-Lookup-Tabelle mit einer gaußförmigen Intensitätsverteilung, basierend auf der ermittelten Standardabweichung, erzeugt. Die 1D-Lookup-Tabelle repräsentiert den optimalen Laserlinienquerschnitt. Die Verteilung wird aufgrund der Annahme einer gaußförmigen Intensitätsverteilung der Laserlinie (siehe [FN91]) gewählt. Die Einträge der Tabelle ergeben sich anhand der Gleichung 4.11. Die dort angegebene Zahl 255,0 ergibt sich anhand des maximalen Grauwertes des 8-Bit Bildes.

$$T_w = 255,0 \cdot e^{-\frac{(w - peak)^2}{2\sigma_{Schätzung}^2}} \quad (4.11)$$

Der fünfte Schritt vergleicht an allen Querschnitten der segmentierten Laserlinie die Intensitäten mit den Werten in der Lookup-Tabelle. Dazu wird die Differenz der Intensitäten (Querschnitt aus Bildaufnahme und 1D-Lookup-Tabelle) an den entsprechenden Pixeln quadriert und aufsummiert. Es ergibt sich für jeden Querschnitt der Mean-Square-Error anhand der Gleichung 4.12.

$$MSE_k = \sum_w (Pixel_w - T_w)^2 \quad (4.12)$$

Aus der Summe aller MSE_k ergibt sich der Wert $MSE_{Laserline}$ für die gesamte Laserlinie (Gleichung 4.13).

$$MSE_{Laserline} = \frac{1}{k} \sum_k MSE_k \quad (4.13)$$

Der Wert von $MSE_{\text{Laserline}}$ wird für mehrere Bilder mit unterschiedlicher Belichtungszeit bestimmt. Es wird das Bild mit dem kleinsten Wert als optimale Abbildung der Laserlinie ausgewählt.

Des Weiteren wird dem User bei diesem Verfahren eine Rückmeldung gegeben, falls eine Bewertung als nicht zuverlässig eingestuft wird. Eine Warnmeldung wird ausgegeben, wenn einer der folgenden Punkte zutrifft:

1. Die Anzahl der Schätzerquerschnitte $\vec{S}Q_k$ ist kleiner als 5% aller segmentierten Linienpixel. Ist die Anzahl zu gering, wird von einer schlecht segmentierten Laserlinie ausgegangen.
2. Der maximale Abstand zweier benachbarter Schätzerquerschnitte ist größer als 50% der Länge des Linienmodells. Tritt dieser Fall ein, wird eine schlecht segmentierte Laserlinie als Ursache angenommen.

Mit der Vorstellung der Verfahren zur Qualitätsbewertung sind alle Stufen der Belichtungsregelung aus Abschnitt 4.2 näher erläutert worden. Für eine automatische Belichtungsregelung müssen für die beiden Qualitätsbewertungsverfahren noch geeignete Parameterwerte festgelegt werden. Dies wird im folgenden Abschnitt behandelt.

4.7 Parametrisierung

Für die Bestimmung geeigneter Werte der Bewertungsverfahren (Kennzahlensystem und Gauß-Einpassung) wird im Programm eine Batch-Funktion implementiert, welche einen Satz von Wertkombinationen auf einen Testbildsatz (Belichtungsreihe mehrerer Objekte) anwendet und vergleicht. Es werden alle Kombinationen durchlaufen. Das entspricht einem vollständigen Versuchsplan. Diese Strategie wurde bereits erfolgreich in [Fut11] zur Parametrisierung der modellbasierten Segmentierungsverfahren eingesetzt. Zur Ermittlung geeigneter Werte existieren weitere Strategien (Teilfaktorplan bei bekannten geringen Wechselwirkungen von Parametern, Neuronale Netze, ...). Der vollständige Versuchsplan ist jedoch schnell umsetzbar. Nachteilig ist hier der Rechenaufwand, da jeder weitere mögliche Wert eines Parameters die Zahl der Simulationen exponentiell ansteigen lässt. Die Ergebnisse einzelner Durchläufe werden in einer csv-Datei abgelegt. Hier finden sich die einzelnen Werte der Parameter der einzelnen Durchläufe und die Qualitätsbewertung des Durchlaufs.

Zur Qualitätsbewertung eines Durchlaufs wird zuerst eine geschätzte beste Abbildung der Laserlinie gesucht. Dazu wird basierend auf einer Belichtungsreihe mit Bildern über das gesamte Spektrum (unterbelichtet bis überbelichtet) jeweils für jeden Laserlinienquerschnitt ein passendes Bild ausgewählt. Als Querschnitt wird jeweils die Bildspalte/-zeile gewählt, bei welcher der maximale Grauwert kleiner dem maximalen Grauwert (255) und diesem Maximum am nächsten ist. Es wird eine virtuelle Abbildung einer Laserlinie erzeugt, welche die geschätzte beste Belichtung besitzt. Mittels der Peak Detection ergeben sich die Punkte der synthetischen idealen Profillinie. Als Basis für einen Qualitätsvergleich wird im Folgenden ein Distanzmaß beschrieben.

4.7 Parametrisierung

Bei jedem Durchlauf ermittelt die Regelung, basierend auf einem Parametersatz, eine geeignete Abbildung der Laserlinie. Dieses Bild wird automatisch segmentiert und es wird eine Peak Detection durchgeführt (die benötigten Querschnitte der Laserlinie sind aus Bildspalten/-zeilen entnommen). Die ermittelten Peaks werden mit den Punkten der synthetischen idealen Profillinie verglichen. Es wird die Standardabweichung bestimmt. Dazu werden die n Bildspalten/-zeilen ausgewählt, in denen sowohl ein Peak in der synthetischen idealen Profillinie $peak_{Ideal}$, als auch im ermittelten Bild (nach der Regelung) ein Peak $peak_{Reg}$ existiert. Die Abstände der Peaks werden anhand der Standardabweichung in Gleichung 4.14 bewertet.

$$\sigma_{Peaks} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_1^n (peak_{Reg_n} - peak_{Ideal_n})^2} \quad (4.14)$$

Die Standardabweichung wird ein Teil der Qualitätsbewertung des Parametersatzes. Als zweiter Teil fließt auch das Verhältnis von Anzahl verglichener Peaks zu Anzahl der Peaks in der synthetischen idealen Profillinie in die weitere Bewertung mit ein. Es soll die Anzahl der gefundenen Peaks entlang der Kontur bewertet werden. Aus der Standardabweichung und der Anzahl der gefundenen Peaks ergibt sich der Qualitätswert eines Durchlaufes anhand der folgenden Gleichung 4.15.

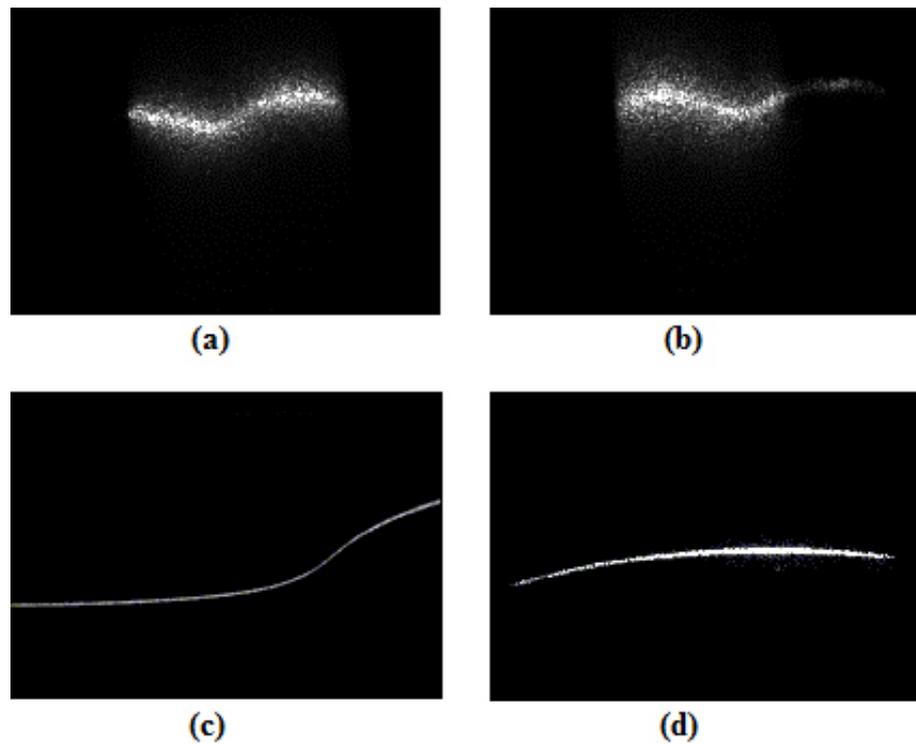
$$Q_{Laserline} = \begin{cases} \infty, & \text{wenn } Anzahl(peak_{Reg}) = 0 \\ \sigma_{Peaks} \cdot \frac{Anzahl(peak_{Ideal})}{Anzahl(peak_{Reg})}, & \text{andernfalls} \end{cases} \quad (4.15)$$

Bei steigender Qualität der Laserlinie strebt der Wert $Q_{Laserline}$ gegen 0. Praktisch wird der Wert 0 nicht erreicht, da die ideale Abbildung der Laserlinie synthetisch und nicht Teil der Bilder der Belichtungsreihe ist.

Bei der Parametrisierung der Qualitätsbewertungsverfahren (insbesondere dem Kennzahlensystem) ist zu unterscheiden, für welches Peak Detection-Verfahren dieses eingesetzt werden soll. So ist z. B. bei einem Verfahren, welches die Wendepunkte der Intensitätsverteilung für die Bestimmung des Peaks benutzt, die Verlaufsweite und Plateaubreite ein wichtigeres Kriterium als z. B. bei dem Verfahren „Center of Mass“.

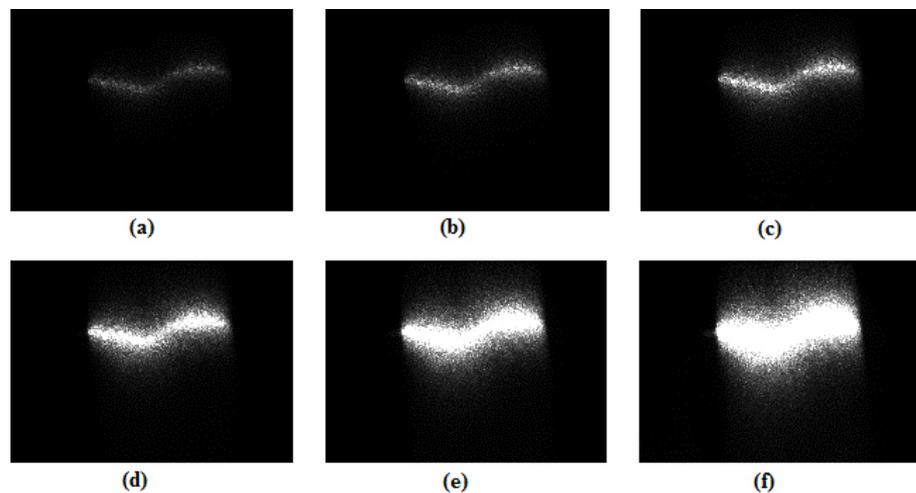
Die Qualitätsbewertungsverfahren werden anhand eines Testdatensatzes trainiert. Dieser besteht aus 20 Belichtungsreihen von unterschiedlichen Objekten. Jede Belichtungsreihe besitzt 25 Bilder. Die jeweilige Belichtungszeit verteilt sich in einem Bereich von sichtbar unterbelichteten bis sichtbar überbelichteten Aufnahmen. In Abbildung 4.10 sind repräsentativ die Profillinien einiger Objekte dargestellt.

Abb. 4.10: Ausgewählte Bildaufnahmen aus dem Testdatensatz. Bild (a) und Bild (b) zeigen die Profillinie einer Brillenfassung, Bild (c) zeigt ein Radsatzprofil und Bild (d) die Profillinie einer Kugel.



In der Abbildung 4.11 ist die Entwicklung der Bildintensität anhand einer Belichtungsreihe von einer Brillenfassung veranschaulicht.

Abb. 4.11: Bildaufnahmen aus der Belichtungsreihe einer Brillenfassung. Bild (a) zeigt die Profillinie bei einer Belichtungszeit von $200 \mu\text{s}$, Bild (b) bei $400 \mu\text{s}$, Bild (c) bei $760 \mu\text{s}$, Bild (d) bei $1500 \mu\text{s}$, Bild (e) bei $2920 \mu\text{s}$ und Bild (f) bei $5680 \mu\text{s}$.



Nachdem die Batch-Funktion mehrere Durchläufe berechnet hat, erlaubt die Auswertung der csv-Datei Rückschlüsse auf geeignete Werte von Parametern. Dies wird am Beispiel im Kapitel der Evaluierung (in Abschnitt 6.1.3) veranschaulicht. Des Weiteren werden im Kapitel der Evaluierung die beiden Qualitätsbewertungsverfahren verglichen und eines der Verfahren für den praktischen Einsatz ausgewählt.

Der folgende Abschnitt beschreibt abschließend den Einsatz der Belichtungsregelung bei der Vermessung unterschiedlicher Objekte.

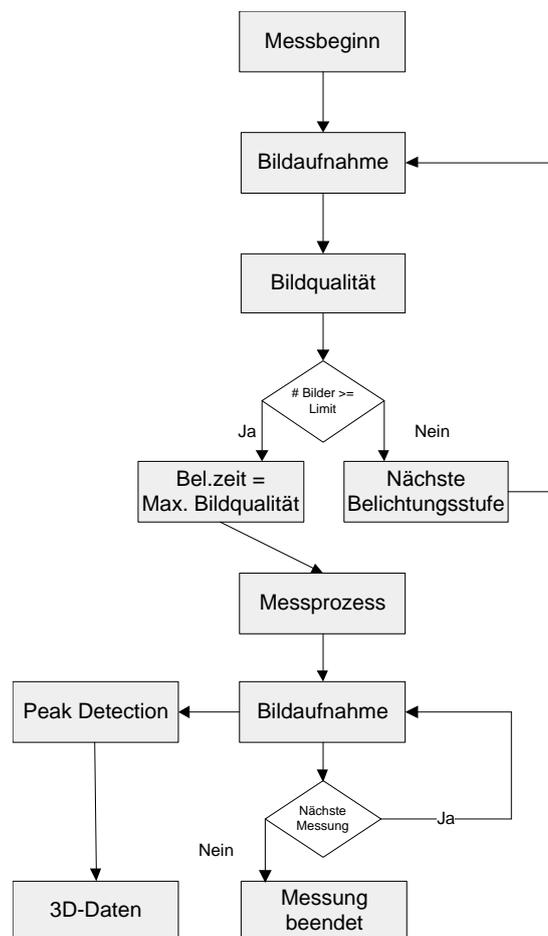
4.8 Einsatz der Regelung im Messprozess

Die Belichtungsregelung kann auf mehrere Arten eingesetzt werden. Der folgende Abschnitt beschreibt den Einsatz nur zu Beginn der Messung und der anschließende Abschnitt den Einsatz während der Messung.

4.8.1 Einmalige Regelung vor der Messung

Wird ein Objekt mit konstanten Oberflächeneigenschaften vermessen und es ist ein schneller Messprozess gewünscht, so kann eine Regelung genügen, welche nur einmalig vor Messbeginn die optimale Belichtung einstellt (siehe Abbildung 4.12).

Abb. 4.12: Das Schema zeigt die Verwendung der Belichtungsregelung nur am Beginn der Messung. Es wird am Start einmalig die optimale Belichtungszeit ermittelt und während des Messprozesses beibehalten. Dazu wird bei mehreren Bildern ein Qualitätswert bestimmt. Die Anzahl und die Belichtungszeiten der Bilder sind vorab festgelegt. Dies verhindert die Ermittlung und Verwendung eines lokalen Qualitätsmaximums. Die qualitativ beste Abbildung bestimmt die Belichtungszeit während des gesamten Messprozesses.



Eine einmalige Regelung der Belichtung vor dem Messprozess genügt z. B. bei der Vermessung von Radsatzprofilen. Hier bleibt während der Messung der Abstand zwischen Messsystem und Messobjekt (sowie die Orientierung) relativ konstant.

Das Bewerten von einer bestimmten Anzahl von Bildern vor dem Messprozess und die Auswahl der Belichtungszeit anhand des besten Qualitätswerts ist streng genommen keine klassische Regelung. Die Bezeichnung „initiale Belichtungsregelung“ wird daher nur zwecks Abkürzung im Folgenden beibehalten. Eine Regelung wird während des Messprozesses eingesetzt.

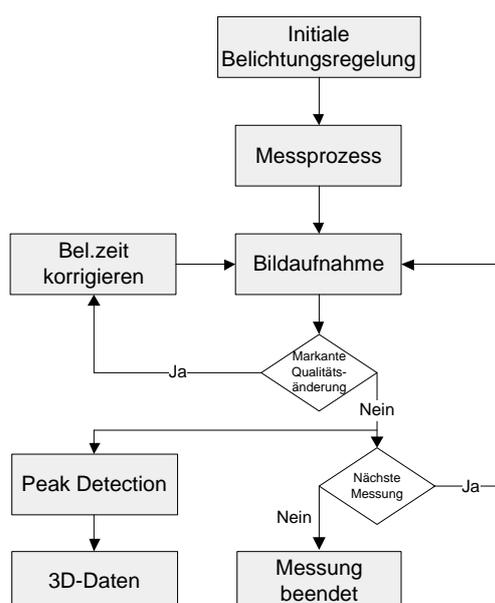
4.8.2 Regelung während des Messprozesses

Bei Vermessung von Objekten mit variierenden Oberflächeneigenschaften soll eine Regelung der Belichtung auch während des Messprozesses stattfinden. Dazu wird bei jeder Bildaufnahme überprüft, ob markante Änderungen bei der Bildqualität auftreten. Dies wird anhand von den drei folgenden möglichen Kriterien erkannt:

1. Das Bild durchläuft nicht mehr alle Stufen der Bewertung (Abbildung 4.2), so erreicht z. B. ein Bild nicht mehr die Bewertung nach der Segmentierung, da es von der Stufe mit dem Histogramm verworfen wird.
2. Bei dem Bewertungsverfahren Gauß-Einpassung und Kennzahlensystem ergibt sich eine markante Änderung des Qualitätswertes (MSE bzw. Bildkennzahl), z. B. 20 Prozent seit der letzten Belichtungsregelung. Da sich die Laserlinie während der Messung verändert, gilt es hier einen geeigneten Prozentwert festzulegen. Dieser darf nicht zu niedrig sein, da bei einem schnellen Messprozess nicht für jedes Bild die optimale Belichtung komplett neu ermittelt und eingestellt werden soll (ähnlich dem Konzept des Verhinderns von Flickern aus dem Abschnitt 3.1).
3. Ein manuell festlegbarer Wert gibt an, nach welcher Anzahl von Bildern eine erneute Regelung der Belichtung vorgenommen werden soll. Anhand des Wertes kann der Nutzer sein gewünschtes Verhältnis aus Geschwindigkeit und Qualität des Messprozesses festlegen. Maximale Qualität bedeutet ein Wert von 1 (Regelung nach jeder Aufnahme). Ein größerer Wert wird die Geschwindigkeit erhöhen (bei möglichem Qualitätsverlust). Das Verfahren ermöglicht eine Balance zwischen Qualität der gesamten Messung und Dauer des Messprozesses.

Bei einer Regelung der Belichtung während des Messprozesses ändert sich der entsprechende Abschnitt des Graphen. Die folgende Abbildung 4.13 zeigt den Ablauf als Graphen.

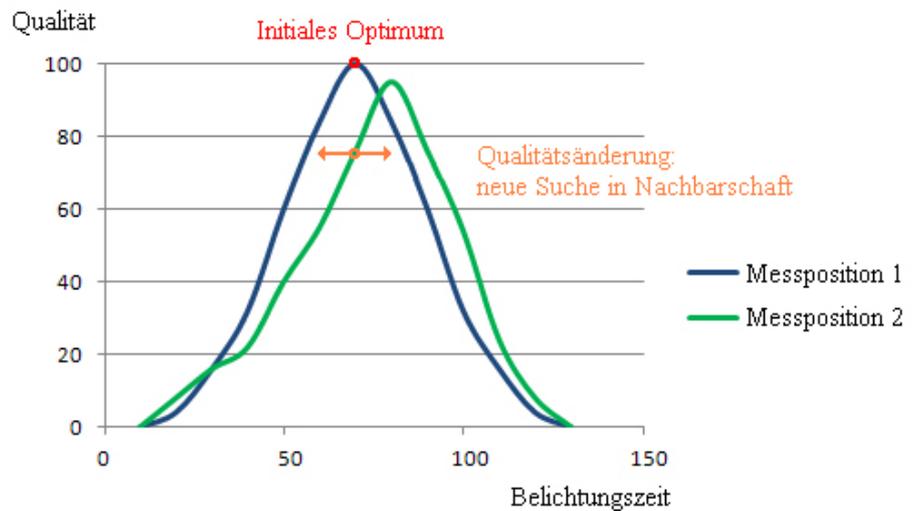
Abb. 4.13: Das Schema zeigt die Regelung der Belichtung während des Messprozesses. Ergibt sich eine markante Qualitätsänderung, so wird im Bereich der aktuellen Belichtungszeit ein neues lokales Qualitätsoptimum gesucht.



4.9 Zusammenfassung

Bei einer markanten Änderung der Qualität wird in der Nachbarschaft der aktuellen Belichtungszeit ein lokales Qualitätsmaximum gesucht (siehe Abbildung 4.14). Die ermittelte Qualität wird wiederum bei der nächsten Regelung als Optimum genutzt.

Abb. 4.14: Vor dem Messprozess wird ein annäherndes Qualitätsoptimum anhand von Bildaufnahmen ermittelt (blaue Kurve). Bei Aufnahme eines Bildes von einer neuen Messposition wird die Differenz des Qualitätswertes betrachtet. Existiert eine markante Änderung, so wird lokal ein neues Qualitätsmaximum gesucht.



Der weitere Teil der Arbeit konzentriert sich auf die Umsetzung und Evaluierung der einmaligen Ermittlung der optimalen Belichtungszeit vor dem Messprozess, da aufgrund des eingeschränkten Zeitrahmens der Arbeit eine Regelung während des Messprozesses nicht umgesetzt wird. Anhand des Kapitels der Evaluierung lässt sich jedoch ableiten, dass die beschriebene Strategie erfolgreich eingesetzt werden kann.

4.9 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde ein Konzept zur automatischen Belichtungsregelung für den Laserlichtschnitt vorgestellt. Dazu wurde ein mehrstufiges System zur Bewertung von Bildaufnahmen der Laserlinie bei unterschiedlichen Belichtungszeiten entwickelt. In der ersten Stufe werden nach Analyse eines Histogramms stark unterbelichtete/überbelichtete Bilder verworfen. Nach Segmentierung der Laserlinie werden die Querschnitte extrahiert und bewertet. Dazu wurden 2 Bewertungsverfahren vorgestellt. Des Weiteren wurde ein Verfahren beschrieben, um geeignete Parameterwerte für eine stabile automatische Qualitätsbewertung zu ermitteln. Die Belichtungsregelung bestimmt bei mehreren Bildern einen Qualitätswert. Die qualitativ beste Abbildung bestimmt die Belichtungszeit während des Messprozesses.

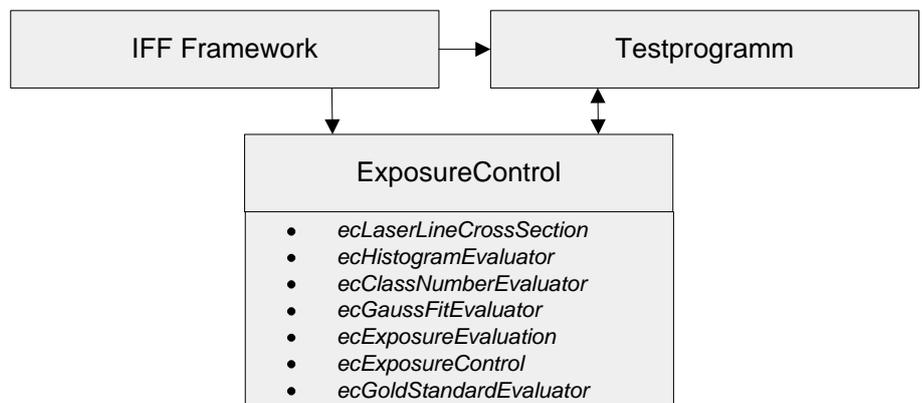
Das folgende Kapitel widmet sich der Umsetzung des Konzepts.

Dieses Kapitel betrachtet die Implementierung des entwickelten Konzeptes.

In den Vorarbeiten [Fut11] wurde mittels C++ ein Programm erstellt, welches die Segmentierung von Laserlinien berechnet. Dazu wird die Bibliothek wx-Widgets ([wxW]) für die Visualisierung verwendet.

Das Programm wurde in dieser Arbeit erweitert. Dazu wurde das Regelungskonzept mittels C++ in ein Plugin (dynamische Bibliothek) umgesetzt. Zur Evaluierung wurde die Bibliothek an das Testprogramm angebunden (siehe Abbildung 5.1).

Abb. 5.1: Die schematische Darstellung zeigt die Bibliothek „ExposureControl“ mit den enthaltenen Klassen zur Belichtungsregelung. Die Bibliothek und das Testprogramm nutzen Funktionen vom IFF-internen Framework. Dazu zählen das Laden von Bildern, Segmentierung der Laserlinie und Peak Detection. Das Testprogramm ruft Funktionen der entwickelten Bibliothek auf und visualisiert die Ergebnisse.



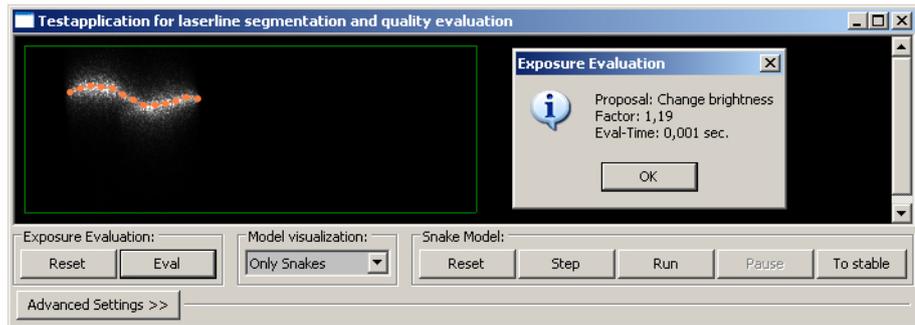
Die Klassen für die Segmentierung der Laserlinie sind Bestandteil des internen Frameworks vom Fraunhofer IFF. Die im Konzept vorgestellten Erweiterungen für die Segmentierung sind direkt in den vorhandenen Klassen ergänzt worden.

In der Bibliothek „ExposureControl“ befindet sich die Klasse *ecLaserLineCrossSection* für die Querschnitte der Laserlinie (bildet Abschnitt 4.5 ab) und die Klassen für die Bewertungsverfahren. Diese sind *ecHistogramEvaluator* (Histogramm, Abschnitt 4.3), *ecClassNumberEvaluator* (Kennzahlensystem, Abschnitt 4.6.1) und *ecGaussFitEvaluator* (Gauß-Einpassung, Abschnitt 4.6.2). Die Evaluierung eines Bildes anhand der in Abschnitt 4.2 dargestellten Stu-

fen zur Belichtungsregelung ist in der Klasse *ecExposureEvaluation* abgebildet. Das Regelungskonzept in Abschnitt 4.8 ist in der Klasse *ecExposureControl* abgebildet. Abschließend findet sich die Klasse *ecGoldStandardEvaluator*. Diese besitzt Funktionen für die Erzeugung der synthetischen idealen Profillinie und der darauf basierenden Qualitätsbewertung aus Abschnitt 4.7 (die synthetische ideale Profillinie wird intern als „Gold Standard“ bezeichnet).

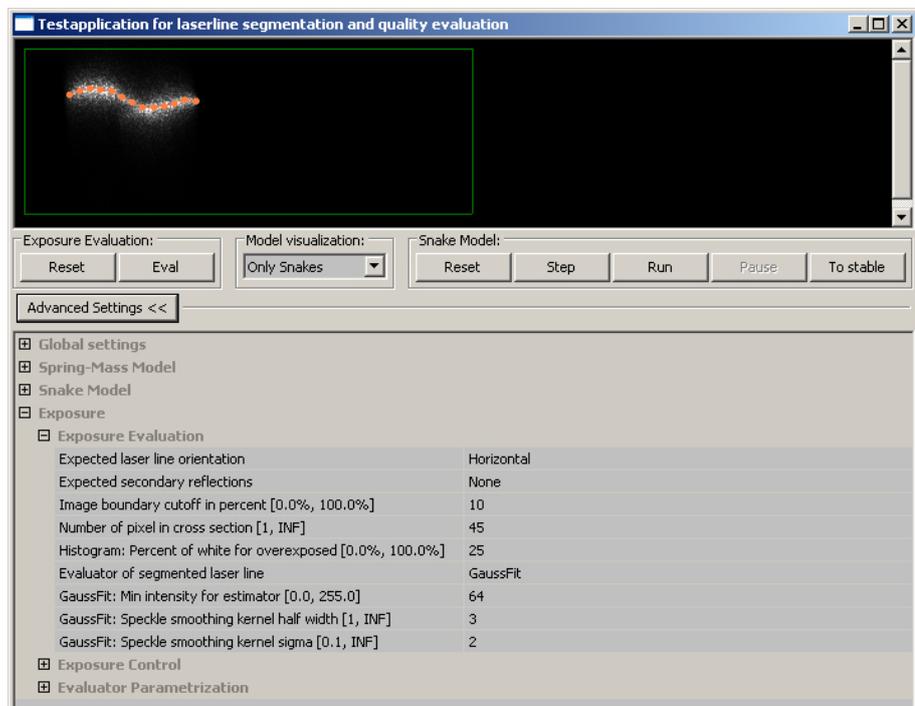
Die Abbildung 5.2 zeigt einen Screenshot des Programms. Hinzugekommen sind Buttons, die eine sofortige Bewertung des aktuell geladenen Laserlinienbildes ermöglichen.

Abb. 5.2: Screenshot des Testprogrammes. In dieser Arbeit wurde in der GUI eine Static Box „Exposure Evaluation“ mit zwei Buttons hinzugefügt. Dies ermöglicht eine Bewertung des aktuell geladenen Bildes. Das Ergebnis der Bewertung wird anhand einer Message Box ausgegeben. In diesem Beispiel wird das Bild nicht akzeptiert und ein neues Bild mit 1,19-facher Belichtungszeit gewünscht.



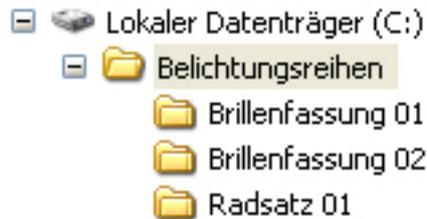
Die Schaltfläche „Advanced Settings“ gibt weitere Einstellungsmöglichkeiten frei (siehe Abbildung 5.3). Die erweiterten Optionen legen die Parameterwerte für die Evaluierung fest. Diese werden an das Plugin übergeben. Damit kann der Nutzer bei Änderungen von Parameterwerten sehr schnell die Auswirkungen auf die Qualitätsbewertung begutachten.

Abb. 5.3: In den erweiterten Einstellungen lassen sich die einzelnen Parameterwerte für die Stufen der Evaluierung der Bildaufnahme (Abschnitt 4.2) festlegen. Für einzelne Parameter ist der Wertebereich vorgeben, um die Nutzung zu vereinfachen. Des Weiteren werden nur die Parameter der aktuell verwendeten Bewertungsverfahren angezeigt. Bei diesem Beispiel werden nicht die Parameterwerte des Kennzahlensystems angezeigt, da das Verfahren mittels Gauß-Einpassung zur Bewertung der Qualität der Laserlinie gewählt ist.



Zur Parametrisierung der Qualitätsbewertungsverfahren (Kennzahlensystem, Gauß-Einpassung) wurde eine Batch-Funktion implementiert. Diese simuliert die Belichtungsregelung anhand eines Testbildsatzes und speichert die Ergebnisse. Zur Nutzung dieser Funktion wird zunächst vom Benutzer ein Ordner erstellt, welcher weitere Ordner mit Belichtungsreihen unterschiedlicher Objekte beinhaltet (Beispiel in Abbildung 5.4). Die Belichtungsreihen werden mit den spezifischen Messsystemen erzeugt und in den einzelnen Ordnern abgelegt. Die jeweilige Belichtungszeit eines Bildes ist in den Dateinamen kodiert.

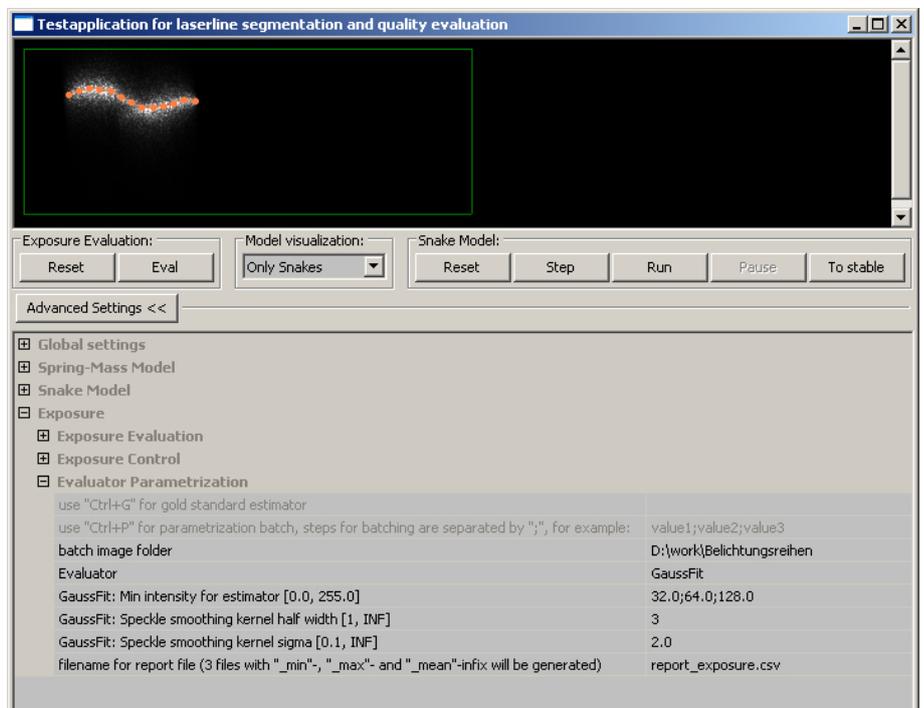
Abb. 5.4: Beispiel der Ordnerstruktur eines Testdatensatzes für die Parametrisierung.



Im nächsten Schritt wird mittels des Testprogramms zu jeder Belichtungsreihe eine Textdatei erzeugt (im jeweiligen Ordner), welche die Werte der synthetischen idealen Profillinie enthält (anhand derer wird jeder Durchlauf einer Belichtungsregelung bewertet).

Anschließend werden die Parameterwerte für die einzelnen Durchläufe der Belichtungsregelung festgelegt und die Batch gestartet (siehe Abbildung 5.5). Während eines Durchlaufs einer Regelung sucht das Plugin die nächste mögliche Belichtungszeit anhand des Dateinamens und lädt dieses Bild.

Abb. 5.5: Das Testprogramm ermöglicht die Parametrisierung der Qualitätsbewertungsverfahren mittels einer Batch-Funktion. Zu jedem Parameter können mehrere Werte (getrennt durch „;“) angegeben werden. Bei der Parametrisierung durchläuft das Programm alle Kombinationen und speichert die Ergebnisse. Dazu wird zuerst per Hotkey Str+G für jede vorliegende Belichtungsreihe eine synthetische ideale Profillinie (intern als Gold Standard bezeichnet) erzeugt. Mittels Hotkey Str+P wird die Batch zur Parametrisierung gestartet. Die benutzten Parameterwerte und Ergebnisse eines Durchlaufs (Qualitätsvergleich zu synthetischer idealer Profillinie) werden in einer csv-Datei gespeichert.



Die implementierte Batch-Funktion ermöglicht auf dem Testsystem (Intel Core 2 mit 2,4 GHz und 3 GB RAM) mehrere tausend Durchläufe einer Belichtungsregelung pro Stunde.

6

Evaluierung der Ergebnisse

In diesem Kapitel wird die Umsetzung des Konzeptes betrachtet und bewertet. Zuerst werden die einzelnen Stufen der Regelung betrachtet. Dazu werden die Weiterentwicklungen der Segmentierung der Laserlinie analysiert. Anschließend erfolgt eine Betrachtung der Grenzen der jeweiligen Stufen der Belichtungsregelung. Im darauffolgenden Abschnitt wird die Parametrisierung der Qualitätsbewertungsverfahren der Laserlinie betrachtet. Danach wird die Belichtungsregelung evaluiert. Es werden zuerst Strategien für die Evaluierung der Qualität vorgestellt und Methoden für diese Arbeit gewählt. Im anschließenden Abschnitt erfolgt die Evaluierung der Qualität mittels der gewählten Methodik. Es folgt ein Abschnitt zur Laufzeitbetrachtung der Belichtungsregelung. Abschließend wird aus den beiden Qualitätsbewertungsverfahren der Laserlinie (Gauß-Einpassung und Kennzahlensystem) ein Verfahren für den weiteren Einsatz in der Praxis ausgewählt.

6.1 Beurteilung der Regelungsstufen

6.1.1 Weiterentwicklung des Segmentierungsprozesses

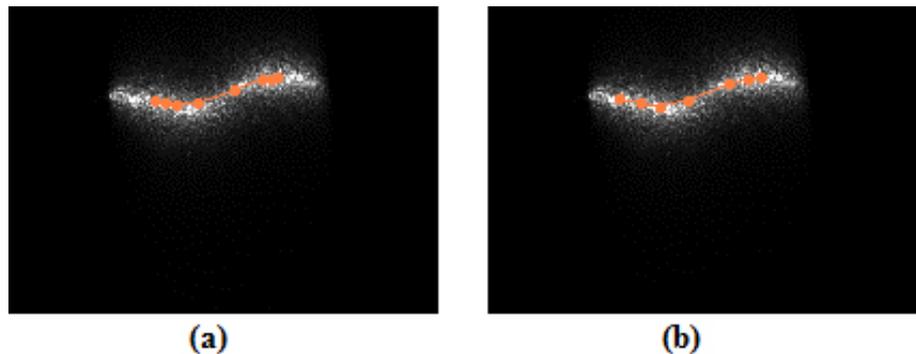
In diesem Abschnitt werden die in Abschnitt 4.4 vorgestellten Erweiterungen der Segmentierung der Laserlinie evaluiert.

Zuerst wird die Veränderung des (manuellen) Schwellwertes für die Modellgenerierung, basierend auf einem Histogramm, betrachtet. Die Verbesserung der Segmentierungsqualität wurde bereits in Abschnitt 4.4 dargestellt. Die implementierte Erweiterung ermöglicht eine relativ konstant bleibende Größe des Linienmodells bei unterbelichteten Bildaufnahmen im Vergleich zu einer Bildaufnahme mit geeigneter Belichtung. Dies erhöht die Zuverlässigkeit der Qualitätsbewertung, da auch der zu bewertende Bildbereich relativ konstant bleibt.

Die zweite Erweiterung betrifft die Modifizierung des Intensitätssensors. Nach der Änderung ist die Breite des Glättungs-Kernels abhängig von der Intensität unter dem Sensor. Dies verbessert die Segmentierungsqualität, da ein größerer Teil der Laserlinie segmentiert wird. Abbildung 6.1 zeigt dies am Beispiel der

Brillenfassung. Des Weiteren wird die Laufzeit für die Berechnung der Intensitätskraft im Schnitt um 30% gesenkt.

Abb. 6.1: In Abbildung (a) ist das Linienmodell nach der Segmentierung mit dem alten Intensitätssensor dargestellt. Die Abbildung (b) zeigt den verbesserten Ansatz. Dieser erlaubt es, einen größeren Teil der Laserlinie zu segmentieren.



Die dritte Erweiterung ist die Ausnutzung eines Mehrkernsystems. Eine prototypische Implementierung zeigt, dass die Strategie des Aufteilens der Glättung der Pixel und die Strategie des Aufteilens der Kontrollpunkte zu einer erhöhten Laufzeit führt. In beiden Fällen sind die Jobs für die einzelnen Threads zu klein, d. h. das Verhältnis von Zeit für die Bearbeitung des Jobs und Initialisierung des Jobs (Thread Resume) ist zu gering. Des Weiteren geht Zeit bei der Synchronisation verloren. Erst wenn alle Threads fertig sind, beginnt die nächste Iteration des Segmentierungsprozesses. Eine Laufzeitverkürzung tritt bei der Strategie „Force Map Prediction“ ein, bei der die Kerne unabhängig die Einträge der Kräftekarte berechnen. Die Laufzeit verringert sich im Schnitt um 40% (Zweikernsystem). Bei dieser Methode geht keine Zeit aufgrund von Synchronisation verloren.

6.1.2 Grenzen der Regelungsstufen

Der Einsatz des vorgestellten Konzeptes zur Belichtungsregelung besitzt Grenzen. Diese werden in diesem Abschnitt beschrieben.

Zunächst ergeben sich allgemeine Einschränkungen aufgrund des primären Einsatzzweckes (Laserlichtschnitt zur Profilvermessung). Es wird ein Linienlaser verwendet, bei dem erwartet wird, dass die auf ein Objekt projizierte Laserlinie auch in der Bildaufnahme (wenn auch deformiert) wiederzufinden ist. Dies bedeutet, die Laserlinie wird nicht beliebig in den Raum projiziert (z. B. wie in Robot Vision). Des Weiteren ist aufgrund des gegebenen Versuchsaufbaus bekannt, ob die Laserlinie im Bild horizontal oder vertikal erwartet wird. Dies sind Informationen, die insbesondere bei der Segmentierung der Laserlinie im vorgestellten Regelungskonzept benutzt werden. Bei anderen Einsatzzwecken (z. B. Verwendung mehrerer paralleler Laserlinien) muss die Segmentierung der Laserlinie entsprechend modifiziert werden.

Weitere Einschränkungen ergeben sich jeweils aus den einzelnen Stufen der Belichtungsregelung (siehe Abbildung 4.2). Zunächst wird die Bewertung mittels Histogramm betrachtet. Diese benötigt ein adäquates Größenverhältnis zwischen abgebildeter Laserlinie und Bildgröße. Ist die Laserlinie nur auf wenige Pixel abgebildet, so wird dies als Punktstörung bewertet. Die Belichtungsregelung wird dann keine zufriedenstellenden Bilder liefern.

Es ergeben sich weitere Einschränkungen bei der verwendeten Segmentierungsmethode. In [Fut11] wird festgestellt, dass eine Laserlinie mit starken Krümmungen möglicherweise nicht optimal segmentiert wird. Des Weiteren muss die zu segmentierende und zu bewertende Laserlinie das hellste Objekt im Bild sein. Ist die Sekundärreflektion das hellere Objekt (z. B. bei Vermessung stark transparenter Objekte), so muss die Segmentierung entsprechend modifiziert werden.

Problematisch bei dem Qualitätsbewertungsverfahren per Gauß-Einpassung ist das Laserspeckle, welches Auswirkungen auf die Berechnung des MSE der Intensitäten hat. Die implementierte Glättung verringert den Einfluss. Jedoch darf diese nicht zu stark gewählt werden, da sonst die Schätzung für die Standardabweichung der Intensitätsverteilung der „idealen“ Laserlinie verfälscht wird. Die Verwendung einer starken Glättung führt zu einer Erhöhung der geschätzten Standardabweichung.

Eine zweite Einschränkung der Gauß-Einpassung für eine stabile Bewertung ist die erwartete, relativ konstant bleibende Tiefenschärfe entlang der Laserlinie. Dies ist bei dem Einsatzzweck im Laserlichtschnitt gegeben. Bei der Profilvermessung wird eine annähernd gleichmäßig scharfe Laserlinie im Bild sichtbar. Kommt es zu starken Veränderungen der Schärfe entlang der Laserlinie, so kann das Verfahren wie folgt modifiziert werden: Nach Ermittlung der Schätzerquerschnitte $\vec{S}Q_k$ und deren geschätzte Standardabweichungen der Intensitätsverteilung σ_{SQ} wird nicht eine Standardabweichung $\sigma_{Schätzung}$ für die gesamte Laserlinie bestimmt. Es werden mehrere (unabhängige) Querschnitte der optimalen Laserlinie für den Vergleich mit der Abbildung bestimmt. Jeder ermittelte Querschnitt der Bildaufnahme wird mit dem naheliegenden optimalen Laserlinienquerschnitt verglichen (oder es wird ein optimaler Laserlinienquerschnitt durch Interpolation der 2 naheliegenden optimalen Laserlinienquerschnitte erstellt).

Das Qualitätsbewertungsverfahren mittels Kennzahlensystem ist sehr stark von der Bildauflösung abhängig. Bei unterschiedlichen Bildauflösungen der Messsysteme ist eine eigene spezielle Parametrisierung nötig. Damit beschäftigt sich der folgende Abschnitt 6.1.3.

6.1.3 Parametrisierung der Qualitätsbewertungsverfahren der Laserlinie

Damit eine stabile Belichtungsregelung im Messsystem vollautomatisch abläuft, müssen für die einzelnen Parameter der Verfahren (z. B. Gewichte einzelner Merkmale im Kennzahlensystem) geeignete Werte ermittelt werden. Dies benötigt etwas Handarbeit. Dazu kann die Batch-Funktion aus Abschnitt 4.7 verwendet werden, welche einen Satz von Wertkombinationen auf einen Testbildsatz anwendet und deren Ergebnisse speichert. Die folgende Abbildung 6.2 zeigt ein Beispiel bei der Parametrisierung des Kennzahlensystems. Die dort dargestellte Tabelle zeigt die Werte der einzelnen Durchläufe (zur Übersichtlichkeit nur Parameter für die Verlaufsweite) und deren ermittelte Qualität. Je kleiner der Qualitätswert $qualityDiff$ ist, desto besser ist die Qualität des Parametersatzes. Bei dem vorgestellten Beispiel wurden jeweils zwei Werte für die Gewichtung der Verlaufsweite (0,3 und 0,6) und für die optimale Verlaufsweite (7 Pixel und 14 Pixel) benutzt.

Abb. 6.2: Ansicht einer csv-Datei nach Anwendung der Batch-Funktion. Die Tabelle beinhaltet die Werte der einzelnen Durchläufe und deren bewertete Qualität (qualityDiff).

	A	E	F	G	H	V
1	Sim Num	WeightShape	ShapeMin	ShapeMax	ShapeOpt	qualityDiff
2	1	0,3	5	20	7	0,5596
3	2	0,3	5	20	14	0,6359
4	3	0,6	5	20	7	0,5669
5	4	0,6	5	20	14	0,6631
6						

Da ein Parameterwert bei mehreren Belichtungsreihen und in Kombination mit den Werten anderer Parameter angewendet wird, eignet sich eine weitere Auswertung anhand von Pivot-Tabellen. Die Abbildung 6.3 zeigt eine Pivot-Tabelle für die optimale Verlaufsweite. Anhand der Tabelle lässt sich feststellen, dass der Wert 7 eine geeignetere Wahl für die optimale Verlaufsweite ist.

Abb. 6.3: Pivot-Tabelle für die optimale Verlaufsweite. Ein Parameterwert wird bei mehreren Belichtungsreihen und in Kombination mit mehreren Werten anderer Parameter angewandt. Die Pivot-Tabelle listet den minimal/maximal und mittleren erzeugten Qualitätswert.

	A	B	C
1			
2		ShapeOpt	
3	Werte	7	14
4	Minimum von qualityDiff	0,5596	0,6359
5	Mittelwert von qualityDiff	0,5633	0,6495
6	Maximum von qualityDiff	0,5669	0,6631

Das Verfahren der Gauß-Einpassung besitzt deutlich weniger Parameter und ist deshalb sehr schnell parametrisiert. Das Kennzahlensystem benötigt durch seine hohe Anzahl festzulegender Parameterwerte mehr Handarbeit bei der Parametrisierung. Die Abbildung von Laserlinienmerkmalen auf Kennzahlen besitzt einen gewissen Abstraktionsgrad, bei dem der Nutzer nicht unmittelbar eine Vorstellung eines geeigneten Wertes für einen Parameter besitzt (z. B. wie ist die Größe einer optimalen Verlaufsweite?). Das Testprogramm bietet Unterstützung bei der Schätzung geeigneter Werte.

Problematisch ist bei dem Kennzahlensystem die Auflösungsabhängigkeit. Die ermittelten geeigneten Parameterwerte sind absolute Werte für bestimmte Bildaufnahmen (z. B. sei die optimale Verlaufsweite gleich 7 Pixel). Bei Einsatz einer Kamera mit z. B. doppelter Auflösung ändert sich jedoch die Anzahl der hellen Pixel eines Laserlinienquerschnittes, wodurch die optimale Verlaufsweite nicht mehr gültig ist. Dies würde eine komplett neue Parametrisierung des Qualitätsbewertungsverfahrens benötigen. Um dem entgegenzuwirken besteht die Möglichkeit, die Werte zur Bildauflösung zu skalieren. Nachteilig ist jedoch, dass damit ein weiterer Abstraktionsgrad für den Nutzer eingeführt wird. Das Verfahren der Gauß-Einpassung ist bei veränderter Bildauflösung deutlich flexibler. Hier müssen ggfs. die Parameter für die Glättung des Speckles justiert werden. Der restliche Bewertungsprozess (Schätzung der Standardabweichung, Intensitätsvergleich, etc.) ist jedoch adaptiv in Bezug auf die Bildauflösung.

An dieser Stelle sei angemerkt, dass ein optimales Qualitätsbewertungsverfahren (z. B. Kennzahlensystem mit optimalen Parameterwerten) individuell für jedes Messsystem und jedes Messobjekt parametrisiert werden muss und nur dort eingesetzt werden kann. Diese Methode bedeutet jedoch viel Handarbeit und ist nicht für den Einsatz in der Praxis geeignet. Für eine Automatisierung

wurden die Bewertungsverfahren anhand von Belichtungsreihen mehrerer Objekte parametrisiert. Dies kann zu einer gewissen Ungenauigkeit/Unsicherheit führen, jedoch wird das Messsystem automatisiert.

6.2 Beurteilung der Belichtungsregelung

6.2.1 Evaluierungsstrategien

Zur Evaluierung existieren mehrere Möglichkeiten.

Eine Möglichkeit ist die Vermessung von Objekten mit bekannten Maßen bei unterschiedlichen Belichtungszeiten und Vergleich der 3D-Daten (ähnlich dem Verfahren in [VGCBK09]). Es wird die Belichtungszeit als ideal eingestuft, bei der die Standardabweichung zwischen realen Objekt und den Messdaten minimal ist. Der Nachteil ist hier, dass entlang der Stufen des Messprozesses (siehe Abbildung 4.1) sehr viele Parameter existieren, die einen unbekanntem Einfluss auf die Messergebnisse haben (Qualität der Kalibrierung, etc.). Des Weiteren werden exakte Laborbedingungen (Temperatur, etc.) benötigt. Da die Rahmenbedingungen und der benötigte Zeitaufwand nicht in dieser Arbeit zur Verfügung steht, wird diese Methode nicht verwendet.

Die zweite Möglichkeit ist die Evaluierung der Bilder nach der Belichtungsregelung. Dazu erfolgt ein subjektiver Vergleich/Bewertung der Bilder durch eine Person. Im nächsten Abschnitt wird diese Methode angewandt. Es werden Beispiele vorgestellt und bewertet.

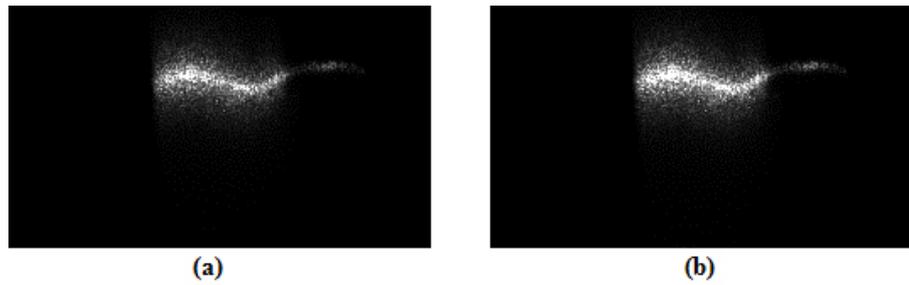
Eine dritte Evaluierungsstrategie ist die Methode aus dem Abschnitt der Parametrisierung (Abschnitt 4.7). Diese sieht einen Vergleich der Peaks mit der synthetischen idealen Laserlinie vor (Standardabweichung und Anzahl gefundener Peaks). Der Vergleich bildet die gewünschten Ziele (hoher Kontrast, Anzahl der Konturpunkte) der Belichtungsregelung ab und wird daher im folgenden Abschnitt als zweite Methode zur Evaluierung eingesetzt.

6.2.2 Ermittlung der optimalen Belichtungszeit

Die implementierte initiale Belichtungsregelung (nach Parametrisierung der Qualitätsbewertungsverfahren) wurde auf die Belichtungsreihen des Testdatensatzes angewandt. Es wurde die initiale Einstellung der optimalen Belichtung vor dem Messprozess simuliert. Im Folgenden sind einige Ergebnisse dargestellt.

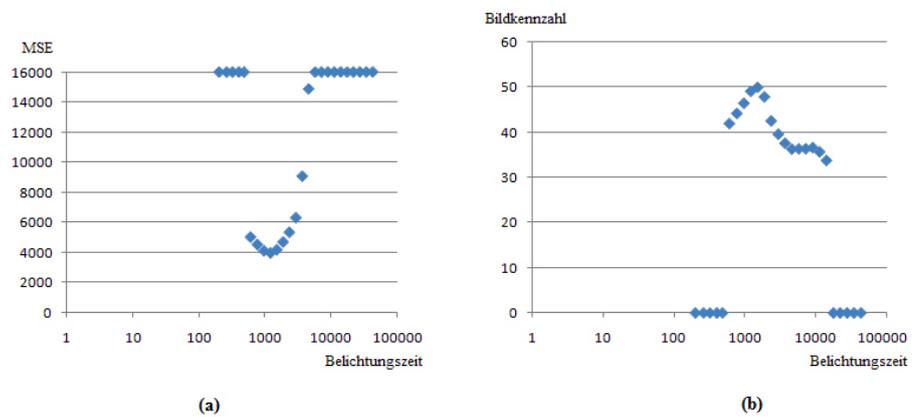
Die folgende Abbildung 6.4 zeigt das Ergebnis der Ermittlung der optimalen Belichtung am Beispiel einer Brillenfassung.

Abb. 6.4: In (a) ist die optimale Abbildung mit einer Belichtungszeit von $1200 \mu\text{s}$ bei Verwendung der Gauß-Einpassung ermittelt worden. Mit dem Kennzahlensystem ergibt sich in (b) die optimale Abbildung mit einer Belichtungszeit von $1500 \mu\text{s}$.



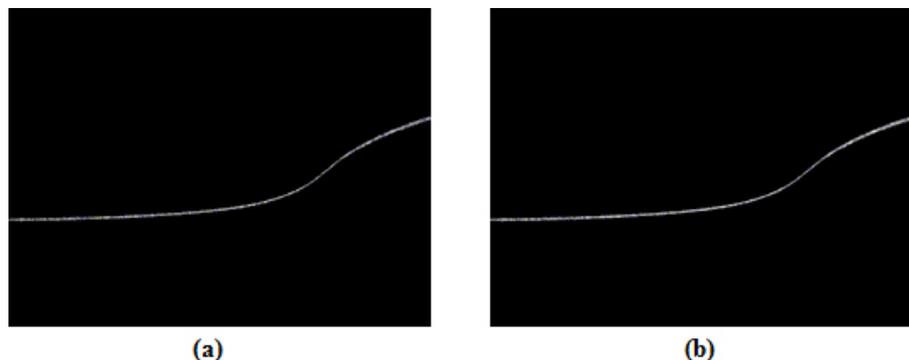
Es ergibt sich ein vergleichbares Ergebnis bei den Bewertungsverfahren Gauß-Einpassung und Kennzahlensystem. Die jeweiligen ermittelten Bilder sind aufeinanderfolgende Bilder der Belichtungsreihe. Beide Bilder sind eine geeignete Abbildung der Laserlinie. Die Laserlinie lässt sich deutlich von ihrem Hintergrund abgrenzen, sodass eine Peak Detection erfolgreich Daten liefert. Die folgende Abbildung zeigt den Verlauf des *MSE* bei der Gauß-Einpassung und der Bildkennzahl bei dem Kennzahlensystem anhand der Belichtungsreihe.

Abb. 6.5: Das Diagramm (a) zeigt den Verlauf des *MSE* und Diagramm (b) der Bildkennzahl bei steigender Belichtungszeit. Konstante Maximalwerte (*MSE*) und Minimalwerte (Bildkennzahl) beschreiben den Fall, bei dem das Bild vorab als unterbelichtet (Histogramm) oder überbelichtet eingestuft wurde.



Die folgende Abbildung 6.6 zeigt die ermittelten besten Abbildungen aus einer Belichtungsreihe eines Radsatzes.

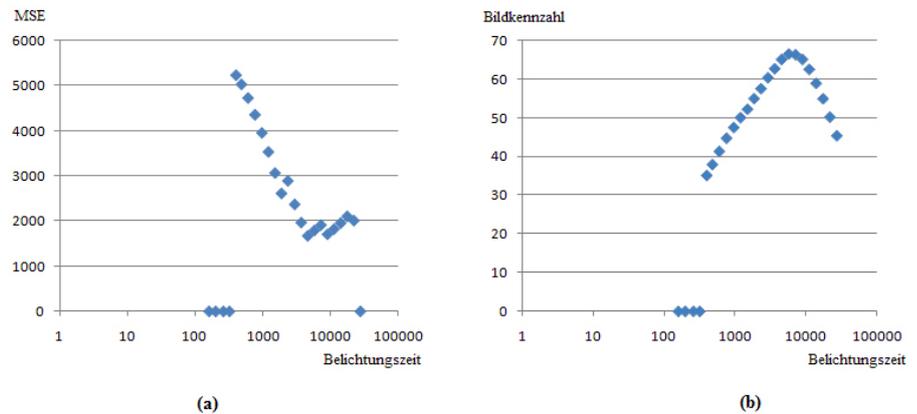
Abb. 6.6: In (a) ist die optimale Abbildung mit einer Belichtungszeit von $4540 \mu\text{s}$ bei Verwendung der Gauß-Einpassung ermittelt worden. Mit dem Kennzahlensystem ergibt sich in (b) die optimale Abbildung mit einer Belichtungszeit von $5680 \mu\text{s}$.



Auch hier ergibt sich ein vergleichbares Ergebnis bei den Bewertungsverfahren Gauß-Einpassung und Kennzahlensystem. Die Laserlinie ist deutlich von ihrem Hintergrund differenzierbar und ermöglicht eine erfolgreiche Peak Detection.

Der Verlauf des MSE bei der Gauß-Einpassung und der Bildkennzahl bei dem Kennzahlensystem ist in folgender Abbildung 6.7 dargestellt.

Abb. 6.7: Entwicklung des MSE (a) und der Bildkennzahl (b) am Beispiel des Radsatzes.



Der Verlauf des MSE bei der Gauß-Einpassung besitzt einzelne Ausreißer. Bei Analyse des Programmablaufs zeigt sich bei den einzelnen Ausreißern ein Sprung der geschätzten Standardabweichung $\sigma_{\text{Schätzung}}$ von 2,5 auf 3,0. Dies führt zu einem breiteren Helligkeitsverlauf bei der Ermittlung eines Querschnitts der geschätzten optimalen Laserlinie. Es empfiehlt sich, die Schätzung der Standardabweichung in Gleichung 4.10 zu modifizieren, um eine genauere Schätzung im Subpixel-Bereich zu ermöglichen. Dazu kann eine ähnliche Strategie wie bei dem Verfahren basierend auf dem FIR-Filter (Peak Detection) verwendet werden.

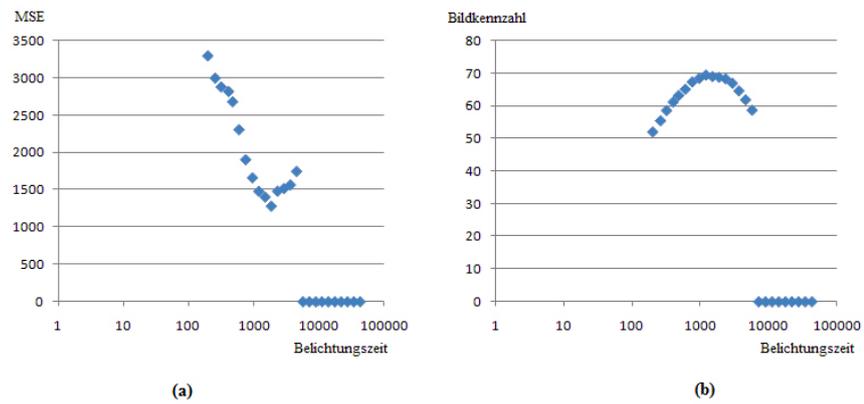
Als letztes Beispiel wird das Ergebnis bei einer Kugel in folgender Abbildung 6.8 betrachtet.

Abb. 6.8: In (a) wurde bei Verwendung der Gauß-Einpassung eine Belichtungszeit von 1860 μs ermittelt. Mit dem Kennzahlensystem wurde in (b) 1200 μs ermittelt.



Es ergibt sich wieder ein vergleichbares Ergebnis bei den Bewertungsverfahren Gauß-Einpassung und Kennzahlensystem. Beide Abbildungen ermöglichen eine erfolgreiche Peak Detection. Die folgende Abbildung 6.9 zeigt den Verlauf des MSE bei der Gauß-Einpassung und der Bildkennzahl bei dem Kennzahlensystem.

Abb. 6.9: Entwicklung des MSE (a) und der Bildkennzahl (b) am Beispiel der Kugel.



Anhand der betrachteten Beispiele zeigt sich, dass beide Bewertungsverfahren die Ermittlung einer geeigneten Belichtungszeit ermöglichen. Anhand des Verlaufs der Kurven vom *MSE* und der Bildkennzahl zeigt sich zudem eine Eignung beider Verfahren für eine Belichtungsregelung während des Messprozesses.

Nach Betrachtung einzelner Bildaufnahmen folgt ein Vergleich der Bildaufnahmen mit der jeweils synthetischen idealen Profillinie (Gleichung 4.15 aus dem Abschnitt 4.7). Es wurden die Qualitätswerte bei den 20 Belichtungsreihen des Testbildsatzes ermittelt. Die folgende Tabelle 6.1 listet die Werte der Qualitätsfunktion für die einzelnen Qualitätsbewertungsverfahren. Es werden jeweils das ermittelte Minimum, Maximum und der Mittelwert bei den verwendeten Belichtungsreihen aufgelistet.

Tabelle 6.1: Die Tabelle zeigt die Qualitätswerte der einzelnen Bewertungsverfahren.

Bewertungsverfahren	Minimum	Mittelwert	Maximum
Gauß-Einpassung	0,14	0,59	1,34
Kennzahlensystem	0,11	0,56	1,05

Anhand der Tabelle zeigt sich das Kennzahlensystem als leicht bessere Wahl. Im Schnitt unterscheidet sich die Qualität jedoch nur geringfügig.

6.2.3 Laufzeitbetrachtung

Die Stufen der Belichtungsregelung besitzen eine gewisse Laufzeit. Da die Laufzeit sehr stark von der Auflösung des Bildes und der Rechenleistung des verwendeten Systems abhängt, ist eine generelle Aussage über die benötigte Zeit schwierig. Um eine vage Vorstellung für die Laufzeit zu geben, sei hier folgendes Beispiel angegeben: Auf dem Testsystem (3 GHz Prozessor) erfolgt eine initiale Ermittlung der optimalen Belichtungszeit bei den Bildern der Brillenfassungen (mit jeweils einer Bildgröße von 364 x 144 Pixel) im Schnitt in ca. 0,1 Sekunden. Dies beinhaltet nicht die Zeit zum Laden der Bilder. Es wurden 20 Bilder bewertet. Die folgende Tabelle 6.2 zeigt die mittlere Laufzeit einzelner Stufen der Belichtungsregelung (aus Abschnitt 4.2).

Tabelle 6.2: Mittlere Laufzeit für ein Bild einer Brillenfassung bei Durchlaufen aller Stufen der Belichtungsregelung.

Stufe	Mittlere Laufzeit
Bewertung mit Histogramm	0,1 msec.
Segmentierung (Snake)	4,16 msec.
Querschnitte der Laserlinie	0,19 msec.
Bewertung mit Gauß-Einpassung/Kennzahlensystem	1,0 msec./0,6 msec.

6.2.4 Auswahl des Verfahrens zur Laserlinienbewertung

Die beiden vorgestellten Ansätze zur Qualitätsbewertung der Laserlinie (Gauß-Einpassung und Kennzahlensystem) ermöglichen eine Regelung der Belichtung. In diesem Abschnitt werden beide Verfahren verglichen und eines der Verfahren für den weiteren Einsatz in der Praxis ausgewählt.

Bei dem aktuellen Stand der umgesetzten Verfahren besitzt das Kennzahlensystem für den Nutzer einen deutlich höheren Aufwand bei der Ermittlung der optimalen Parameterwerte. Das Kennzahlensystem besitzt zudem eine hohe Abhängigkeit von der Bildauflösung. Ein Vergleich der Qualität (Abschnitt 6.2.2) ergibt das Kennzahlensystem als bessere Wahl. Des Weiteren ist auch die Laufzeit (Abschnitt 6.2.3) gegenüber der Gauß-Einpassung im Schnitt etwas geringer.

Anhand des aktuellen Standes der Entwicklung wird die Gauß-Einpassung empfohlen. Bei der Bewertung werden die Laufzeitunterschiede als gering eingestuft, da die Implementierung prototypisch erfolgte. Das Verfahren mittels Gauß-Einpassung besitzt nach Tabelle 6.1 zwar im Schnitt eine geringfügige schlechtere Qualität, jedoch ist es deutlich schneller an das jeweilige Messsystem anpassbar. Vom Anwender ist meist ein einfaches System gewünscht. Mit steigender Anzahl der festzulegenden Parameter sinkt die Akzeptanz deutlich. Deshalb wird an dieser Stelle die Gauß-Einpassung für den weiteren Einsatz in der Praxis empfohlen.

Weiterhin wird empfohlen, die Verfahren weiterzuentwickeln und ggfs. eine Neubewertung durchzuführen. Das Handling des Kennzahlensystems kann verbessert werden, indem z. B. die Parameterwerte (optimale Verlaufsbreite, etc.) zur Bildauflösung skaliert werden. Bei der Gauß-Einpassung kann die Qualität gesteigert werden. Eine Möglichkeit ergibt sich bei der Berechnung der Standardabweichung der Intensitätsverteilung des optimalen Laserlinienquerschnittes. Der Winkel, mit dem der Laser auf die Oberfläche trifft, verschiebt den Schwerpunkt der theoretischen Gauß-Verteilung. Es empfiehlt sich, die Standardabweichung des linken und rechten Teils des Laserlinienquerschnittes unabhängig zu berechnen und darauf basierend den Querschnitt der theoretischen optimalen Laserlinie zu erzeugen.

6.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die umgesetzten Verfahren des Konzeptes evaluiert. Zunächst wurden die Erweiterungen der Segmentierung der Laserlinie betrachtet. Es zeigte sich eine Verbesserung der Segmentierungsqualität und eine Beschleunigung der Segmentierung. Im anschließenden Abschnitt wurden die Grenzen der einzelnen Stufen der Belichtungsregelung analysiert. Es wurde auf Besonderheiten bei dem Einsatz im Laserlichtschnitt hingewiesen. Anschließend wurde die Parametrisierung der Qualitätsbewertungsverfahren der Laserlinie begutachtet. Die vorgestellte Methode erlaubt die Ermittlung geeigneter Parameterwerte. Dieser Prozess gestaltet sich bei der Gauß-Einpassung deutlich schneller. Im darauffolgenden Abschnitt wurden Evaluierungsmethoden für die Qualität der Belichtungsregelung vorgestellt. Mittels einiger der vorgestellten Evaluierungsmethoden wurde im anschließenden Abschnitt die Qualität evaluiert. Diese wurde anhand von Beispielbildern begutachtet. Dazu

wurde der Verlauf der Bildkennzahl/des MSE dargestellt. Anhand derer zeigt sich die Eignung der Bewertungsverfahren Gauß-Einpassung und Kennzahlensystem zur Regelung der Belichtung während des Messprozesses (in dieser Arbeit aufgrund des eingeschränkten Zeitrahmens nicht fertig implementiert). Des Weiteren erfolgte ein Qualitätsvergleich mit der jeweils synthetischen idealen Profillinie. Hier zeigte sich die Qualität beim Kennzahlensystem im Schnitt geringfügig höher. Im anschließenden Kapitel erfolgte eine Betrachtung der Laufzeit der einzelnen Stufen der Belichtungsregelung. Abschließend wurden die Vor- und Nachteile des Kennzahlensystems und der Gauß-Einpassung gegenübergestellt und die Gauß-Einpassung für den weiteren Einsatz in der Praxis empfohlen.



Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Konzept zur automatischen Belichtungsregelung im Laserlichtschnitt entwickelt.

Zuerst wurden in Kapitel 2 die Rahmenbedingungen der Arbeit betrachtet. Dazu wurde analysiert, welche Parameter die Belichtung beeinflussen. Anschließend erfolgte eine Betrachtung des prototypischen Messsystems. Es wurden Bildaufnahmen einzelner Laserlinien gezeigt und deren Problematiken analysiert. Des Weiteren wurde allgemein eine Regelung und deren Abgrenzung zu einer Steuerung betrachtet. Danach wurden die Vor- und Nachteile bei dem Verändern der Laserintensität und/oder der Belichtungszeit gegenübergestellt. Abschließend wurden die weiteren Aufgaben für die zu entwickelnde Belichtungsregelung geschlussfolgert.

Anhand der Voruntersuchungen wurde in Kapitel 3 der aktuelle Stand der Entwicklung betrachtet. In der Literatur zeigt sich in Bezug auf eine Belichtungsregelung sehr häufig ein kamera-bezogener Ansatz. Es wurden verschiedene software- und hardware-basierende Ansätze vorgestellt. Anschließend wurden spezielle Ansätze für den Bereich Laserlichtschnitt betrachtet. Hier zeigt sich ein Fehlen von bildbasierten Ansätzen zur Belichtungsregelung bei der Verwendung von Linienlasern. Für das zu entwickelnde Konzept wurden im weiteren Verlauf mehrere Gebiete betrachtet: Es erfolgte die Darlegung einer robusten Methode zur Segmentierung der Laserlinie. Danach wurde ein Ansatz zur Bewertung der Qualität der Laserlinie mittels Kennzahlen vorgestellt. Anschließend wurde das Ziel der Belichtungsregelung betrachtet. Die ermittelte optimale Abbildung der Laserlinie soll möglichst viele Informationen für die Peak Detection liefern. Da in der Literatur mehrere Ansätze zur Peak Detection existieren, wurde eine Optimierung der Belichtungsregelung auf das Verfahren basierend auf dem FIR-Filter festgelegt.

Im Kapitel 4 wurde basierend auf den vorgestellten Methoden aus dem aktuellen Stand der Entwicklung ein Konzept zur Belichtungsregelung entwickelt. Es wurde ein mehrstufiges System ausgearbeitet, welches Bildaufnahmen bewertet und basierend auf der Qualität ggfs. eine erneute Bildaufnahme veranlasst. Im ersten Schritt werden Bilder durch eine Analyse des Histogramms bei eindeutiger Unter-/Überbelichtung sehr schnell verworfen. Wird ein Bild nicht verworfen, so wird das Bild segmentiert und die Querschnitte der Laserlinie extrahiert. Anhand derer wird die Qualität der Abbildung bewertet. Es wurden 2 Bewertungsverfahren erarbeitet. Das erste Verfahren ist ein weiterentwickeltes Kennzahlensystem, welches Laserlinienmerkmale auf Qualitätswerte abbildet. Das zweite Verfahren ist die Gauß-Einpassung. Dieses vergleicht die Bildaufnahme mit der theoretischen idealen Abbildung der Laserlinie. Nach Entwicklung der Bewertungsverfahren wurde anschließend das Konzept zur Ermittlung geeigneter Parameterwerte der beiden Qualitätsbewertungsverfahren vorgestellt. Dieses besteht aus einem vollständigen Versuchsplan. Abschließend wurde der Einsatz des mehrstufigen Systems zur Belichtungsregelung vor dem Messprozess und während des Messprozesses beschrieben.

Kapitel 5 betrachtete die Implementierung des Konzeptes. Es wurde die Eingliederung in das vorhandene IFF-Framework und des bestehenden Testprogrammes beschrieben. Des Weiteren wurden implementierte Möglichkeiten zur Evaluierung der Belichtungsregelung und zur Parametrisierung der Gauß-Einpassung und des Kennzahlensystems dargestellt.

In Kapitel 6 wurden die umgesetzten Verfahren des Konzeptes ausgewertet. Es wurden die Stufen der Belichtungsregelung und jeweils deren Grenzen betrachtet. Des Weiteren wurde die Methodik der Parametrisierung der Qualitätsbewertungsverfahren der Laserlinie begutachtet. Anschließend wurde die initiale Belichtungsregelung anhand von Beispielaufnahmen demonstriert und bewertet. Es erfolgte ein Qualitätsvergleich von Gauß-Einpassung und dem Kennzahlensystem mit der jeweils synthetischen idealen Profillinie einer Belichtungsreihe. Im Schnitt zeigte sich eine vergleichbare Qualität. Des Weiteren wurde anhand eines Beispiels die Laufzeit der einzelnen Stufen der Belichtungsregelung betrachtet. Abschließend wurde das Verfahren mittels Gauß-Einpassung für den Einsatz als Qualitätsbewertungsverfahren der Laserlinie vorgeschlagen, da es gegenüber dem Kennzahlensystem deutlich anwenderfreundlicher ist.

Abschließendes Fazit: In der vorliegenden Arbeit wurde ein Konzept zur automatischen Belichtungsregelung für den Laserlichtschnitt mit Linienlaser entwickelt. Anhand eines Testbildsatzes wurde die Eignung des Konzeptes demonstriert.

7.2 Ausblick

Anhand des aktuellen Entwicklungsstandes ergeben sich weitere Aufgaben-/Problemstellungen.

Zunächst sollte die Implementierung des Konzeptes zur Regelung während des Messprozess abgeschlossen werden. Des Weiteren wurden bei der Evaluierung mögliche Erweiterungen entwickelt (u. a. stabilere Schätzung der Stan-

dardabweichung bei der Gauß-Einpassung), bei denen eine Umsetzung und Evaluierung interessant ist. Anschließend sollte in weiteren Tests eine größere Anzahl von Objekten/Testsszenarien (insbesondere Live-Test am Messsystem) verwendet werden, um einen stabilen Einsatz in einem kommerziellen Messsystem zu gewährleisten. Daraus ließen sich auch detailliertere Rückschlüsse über die Grenzen und Qualität der eingesetzten Verfahren der Stufen der Belichtungsregelung ableiten.

Zur Geschwindigkeitsverbesserung der Belichtungsregelung ist die Verwendung der GPU interessant. Es entstehen Fixkosten bei der Zeit zum Transferieren der Bildaufnahme in den Grafikkartenspeicher, jedoch werden deutlich geringere variable Kosten (aufgrund der deutlichen schnelleren Bildverarbeitung) erwartet. Dazu eignet sich OpenCL ([ocl]), da für diese API implementierte Algorithmen sowohl auf der CPU, als auch auf der GPU laufen. Ein Programm zur Belichtungsregelung kann dann die vorliegende implementierte Version wählen oder bei entsprechend vorliegender Plattform den OpenCL-Pfad.

Weiterhin ist eine Weiterentwicklung der Peak Detection interessant. Das verwendete Verfahren basierend auf dem FIR-Filter benutzt eine 1D-Glättung (Pixel des Laserlinienquerschnitts). Da Speckle im Bild ein 2D-Effekt ist, wäre eine 2D-Glättung zu untersuchen, da diese die Genauigkeit erhöhen könnte.

Abschließend wird eine weitere Beobachtung der Entwicklung von HDR-Kameras empfohlen. Bei weiterer Verbreitung im Konsumerbereich sinkt der Preis und die Kamera ist damit auch in kostengünstigen Messsystemen einsetzbar. HDR-Kameras reduzieren Überbelichtung, jedoch muss die logarithmische Abbildung der Lichtenergie auf die Bildintensität und deren Einfluss auf die Peak Detection untersucht werden.

Literaturverzeichnis

- [BGH⁺06] BURGHARTZ, Joachim N. ; GRAF, H.-G. ; HARENDT, C. ; KLINGLER, W. ; RICHTER, H. ; STROBEL, M.: HDR CMOS Imagers and Their Applications. 2006
- [BH94] BAUMBERG, Adam ; HOGG, David: Learning Flexible Models from Image Sequences. In: *Computer Vision - ECCV '94*. Springer Berlin/Heidelberg, 1994, ISBN 978-3-540-57956-4, S. 297-308
- [CJK90] CASE, Steven K. ; JALKIO, Jeffrey A. ; KEIL, Robert E.: *Patent #4891772: Point and line range sensors*. 1990
- [Col04] COLLADO, Josep F.: *NEW METHODS FOR TRIANGULATION-BASED SHAPE ACQUISITION USING LASER SCANNERS*. Universitat de Girona, 2004
- [FN91] FISHER, R. B. ; NAIDU, D. K.: A Comparative Analysis of Algorithms for Determining the Peak Position of a Stripe to Subpixel Accuracy. In: *Proc. 1991 British Machine Vision Association Conf.* 1991, S. 217-225
- [FN96] FISHER, R. B. ; NAIDU, D. K.: A Comparison of Algorithms for Subpixel Peak Detection. In: *Image Technology: Advances in Image Processing, Multimedia and Machine Vision*. 1996, S. 385-404
- [FSCP04] FOREST, Josep ; SALVI, Joaquim ; CABRUJA, Enric ; POUS, Carles: Laser stripe peak detector for 3D scanners. A FIR filter approach. In: *Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition*. 2004, S. 646-649
- [Fut11] FUTTERLIEB, Jörg: *Segmentierung von Laserlichtlinien*. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Studienarbeit, 2011
- [IM10] ILSTRUP, David ; MANDUCHI, Roberto: Active Triangulation in the Outdoors: A Photometric Analysis. In: *Proceedings of the 5th International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*. 2010

- [Jäh05] JÄHNE, Bernd: *Digitale Bildverarbeitung*. Springer Berlin/Heidelberg, ISBN 978-3540249993, 2005
- [KC99] KIM, Dea-Gyu ; CHANG, Won-Seok: A Study on a 3-D Profilemeter Using Dynamic Shape Reconstruction with Adaptive Pattern Clustering of the Line-Shaped Laser Light. In: *TENCON 99. Proceedings of the IEEE Region 10 Conference*. 1999, S. 1371–1374
- [KCCL11] KAO, Wen-Chung ; CHENG, Li-Wei ; CHIEN, Chen-Yu ; LIN, Wen-Kuo: Robust Brightness Measurement and Exposure Control in Real-Time Video Recording. In: *IEEE TRANSACTIONS ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT, VOL. 60, NO. 4*. 2011, S. 1206–1216
- [KHKC06] KAO, Wen-Chung ; HSU, Chien-Chih ; KAO, Chih-Chung ; CHEN, Shou-Hung: Adaptive Exposure Control and Real-Time Image Fusion for Surveillance Systems. In: *Proceedings of IEEE International Symposium Circuits and Systems (ISCAS)*. 2006, S. 935–938
- [KKS96] KLETTE, Reinhard ; KOSCHAN, Andreas ; SCHLÜNS, Karsten: *Computer Vision. Räumliche Information aus digitalen Bildern*. Vieweg Verlag, 1996, ISBN 3–528–06625–3
- [KWT88] KASS, Michael ; WITKIN, Andrew ; TERZOPOULOS, Demetri: Snakes: Active Contour Models. In: *International Journal of Computer Vision*. 1988, S. 321–331
- [LIN] *LINLOG™-Technologie der Firma Photonfocus*, <http://www.photonfocus.com/html/eng/cmos/linlog.php>
- [Lit01] LITWILLER, Dave: CCD vs. CMOS: Facts and Fiction. In: *Photonics Spectra. Nr. 1*. 2001
- [LM09] LIU, Weijie ; MARUYA, Kensuke: Detection and Recognition of Traffic Signs in Adverse Conditions. In: *Intelligent Vehicles Symposium, 2009 IEEE*. ISSN 1931-0587, 2009, S. 335–340
- [Mer96] MERKLINGER, Harold M.: Scheimpflugs Patent. In: *Photo Techniques Nov/Dec*. 1996
- [MKMT02] MERTZ, C. ; KOZAR, J. ; MILLER, J. R. ; THORPE, C.: Eye-safe Laser Line Striper for Outside Use. In: *IEEE Intelligent Vehicle Symposium, Volume 2*. 2002, S. 507–512
- [NR07] NOURANI-VATANI, Navid ; ROBERTS, Jonathan: Automatic Camera Exposure Control. In: *Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA)*. 2007
- [NRW06] NUSKE, Stephen ; ROBERTS, Jonathan ; WYETH, Gordon: Extending the Dynamic Range of Robotic Vision. In: *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2006, S. 162–167
- [NWL⁺03] NILSSON, Magnus ; WEERASINGHE, Chaminda ; LICHMAN, Serge ; SHI, Yu ; KHARITONENKO, Igor: DESIGN AND IMPLEMENTATION OF A CMOS SENSOR BASED VIDEO

CAMERA INCORPORATING A COMBINED AWB/AEC MODULE. In: *Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing 2003 (ICASSP)*. 2003, S. 477–480

- [ocl] *OpenCL, (Open Computing Language)*, <http://www.khronos.org/opencv/>
- [PKJ09] PARK, Sang H. ; KIM, Gyu W. ; JEON, Jae W.: The method of Auto Exposure Control for Low-end Digital Camera. In: *Proceedings of the 11th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*. 2009, S. 1712–1714
- [PS06] PASTORIUS, Walt ; SNOW, Mike: Smart Laser Vision Sensors Simplify Inspection. In: *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*. February 2006, S. 33–38
- [Sch04] SCHACHNER, Christian: *Einstellen der Sensorparameter*. Technischer Bericht, 2004
- [Sch06] SCHNEIDER, Verena: *Fixed-Pattern Korrektur von HDRC-Bildsensoren*. Institut für Mikroelektronik, Stuttgart, Doktorarbeit, 2006
- [SF11] SCHNEE, Jost ; FUTTERLIEB, Jörg: Laser Line Segmentation with Dynamic Line Models. In: *Computer Analysis of Images and Patterns: 14th International Conference, CAIP 2011*. 2011, S. 126–134
- [SGG07] SCHULZ, Simon ; GRIMM, Marcus ; GRIGAT, Rolf-Rainer: Optimum Auto Exposure based on High-Dynamic-Range Histogram. In: *Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation (ISPRA)*. 2007, S. 269–274
- [Shi04] SHIRVAIKAR, Mukul V.: An Optimal Measure for Camera Focus and Exposure. In: *Proceedings of the Thirty-Sixth Southeastern Symposium on System Theory*. 2004, S. 472–475
- [Ste08] STEINMÜLLER, Johannes: *Bildanalyse: Von der Bildverarbeitung zur räumlichen Interpretation von Bildern*. Springer Berlin/Heidelberg, 2008, ISBN 978–3540797425, S. 232–237
- [Teu03] TEUTSCH, Christian: *Optimierte Rekonstruktion von 3D-Geometrien aus Laserscan-Daten unter Ausnutzung von Information über den Scan-Prozess*. Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Diplomarbeit, 2003
- [Teu07] TEUTSCH, Christian: *Model-based Analysis and Evaluation of Points Sets from Optical 3D Laser Scanners*. Shaker Verlag, 2007, ISBN 978–3–8322–6775–9
- [VGCBK09] VAN GESTEL, Nick ; CUYPERS, Steven ; BLEYS, Philip ; KRUTH, Jean-Pierre: A performance evaluation test for laser line scanners on CMMs. In: *Optics and Lasers in Engineering, Volume 47*. 2009, ISSN 0143–8166, S. 336–342

- [Wes08] WESTON, Chris: *Fotothek 1: Belichtung*. Markt und Technik, 2008, ISBN 978-3827243843, S. 22-29
- [wik11a] *Regelung (Natur und Technik)*. 2011, [http://de.wikipedia.org/wiki/Regelung_\(Natur_und_Technik\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Regelung_(Natur_und_Technik))
- [wik11b] *Verschluss (Kamera)*. 2011, [http://de.wikipedia.org/wiki/Verschluss_\(Kamera\)](http://de.wikipedia.org/wiki/Verschluss_(Kamera))
- [wxW] *wxWidgets, Cross-Platform GUI Library*, <http://wxwidgets.org/>