



Studienarbeit


Segmentierung von Laserlichtlinien

von Jörg Futterlieb
31. Januar 2011

Betreuer:

Prof. Dr. Klaus D. Tönnies
Dipl.-Ing. Jost Schnee

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



Selbständigkeitserklärung

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

Magdeburg, den 31. Januar 2011

Jörg Futterlieb

Zusammenfassung

Die vorliegende Studienarbeit stellt zwei Verfahren für eine bildbasierte, schnelle und robuste Erkennung von Laserlichtlinien vor. Beide Verfahren benutzen Linienmodelle für eine Segmentierung der Bildaufnahme. Das erste Verfahren verwendet für das Linienmodell das Feder-Masse-Modell, das zweite Verfahren verwendet das Modell der Snakes.

Diese Arbeit erläutert die Grundlagen und den Ablauf beider Verfahren. Zudem wird eine Methode für die automatische Modellgenerierung aus vorhandenen Bilddaten vorgestellt und eine Möglichkeit zur Bestimmung geeigneter Parameter eines Linienmodells für eine vollautomatische Segmentierung gegeben.

Beide Verfahren werden an realen Bildaufnahmen verdeutlicht und es erfolgt ein Vergleich in Bezug auf Segmentierungsqualität und Laufzeit.

Abstract

This assignment presents two methods, using a line model, for image-based, fast and robust detection of laser lines. The first method uses the Spring-Mass Model as line model, the second bases on the Snake Model.

This work illustrates the basics and process of both methods. Furthermore a method for automatic model generation from existing images will be presented. In addition a possibility to determine adequate line model parameters for full automatic segmentation is shown.

The functionality of both methods is shown with a set of images from laser light-section sensors. For both methods the segmentation quality and runtime is compared.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Aufgabenstellung	1
1.3	Aufbau der Arbeit	2
1.4	Anmerkungen zur Arbeit	2
2	Grundlagen	3
2.1	Versuchsaufbau	3
2.2	Testbildsatz	5
2.3	Segmentierung von Objekten	6
2.4	Feder-Masse-Modell	7
2.4.1	Modellaufbau	7
2.4.2	Segmentierungsprozess	8
2.4.3	Stabiles Feder-Masse-Modell	9
2.5	Snake-Modell	10
2.5.1	Modellaufbau	10
2.5.2	Segmentierungsprozess	11
2.6	Zusammenfassung	13
3	Konzept	15
3.1	Linienmodell	15
3.1.1	Linienmodell auf Basis des Feder-Masse-Modells	15
3.1.2	Linienmodell auf Basis des Snake-Modells	16
3.2	Modellgenerierung	16
3.3	Segmentierungsprozess	18
3.3.1	Feder-Masse-Modell	18

3.3.2	Snake-Modell	19
3.4	Parametrisierung	20
3.5	Laufzeitoptimierung	22
3.6	Zusammenfassung	24
4	Implementierung	25
5	Evaluierung der Ergebnisse	29
5.1	Vergleich der Segmentierungsqualität	29
5.2	Vergleich der Laufzeit	33
5.3	Ergebnisse der Laufzeitoptimierung	33
5.4	Allgemeines Handling	34
5.5	Grenzen der Verfahren	36
5.6	Modellwahl für praktischen Einsatz	37
5.7	Zusammenfassung	37
6	Zusammenfassung und Ausblick	39
6.1	Zusammenfassung	39
6.2	Ausblick	40
	Abbildungsverzeichnis	41

1.1 Motivation

Das Lichtschnittverfahren wird bereits seit mehreren Jahrzehnten erfolgreich für berührungslose Geometrie- und Konturerfassung eingesetzt (bereits 1934 nutzte es Carl Zeiss für Gewindeprofilvermessung). Mit Erfindung des NeHe-Lasers wurde diese Methode immer genauer. Die Höhenauflösung kann, je nach Aufgabe, bis in den Mikrometerbereich eingestellt werden. Aktuell wird am Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) ein System für die 3D-Innenkonturmessung von z. B. Brillenfassungen entwickelt. Auf dem Markt befinden sich aufgrund der Vielzahl von Anbietern und Standards viele Arten von Brillenfassungen. Der Zugriff auf Konstruktionspläne ist meist nicht gegeben. Zudem besitzen viele zunehmend in Billiglohnländern hergestellte Brillenfassungen abweichende Formen auch innerhalb der Modellreihe. Daher wird ein Messgerät benötigt, um die Geometrie der Innenkontur der Brillenfassungen vor dem Schleifen der Brillengläser zu vermessen. Bestehende mechanische Systeme zur Abtastung dieser Innenkontur führen zu einer Abnutzung der Tastspitze und können filigrane Fassungen durch die Antastkräfte deformieren. Daher ist ein berührungsfreies optisches Messsystem von Vorteil. Bei der Auswertung der Daten von Laserlichtschnittsensoren ist die Segmentierung der Laserlichtlinie eine wichtige Teilaufgabe.

1.2 Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, einen Algorithmus zu entwickeln, der eine schnelle und robuste Erkennung von Laserlichtlinien (abkürzend Laserlinie genannt) ermöglicht. Bei der Aufnahme der Laserlinie können Störungen auftreten. Dazu zählen sowohl Unterbrechungen in der Laserlinie durch Unterbelichtungen, als auch Überbelichtung auf der Linie aufgrund unterschiedlicher Materialien oder ungünstiger Beobachtungswinkel. Des Weiteren können durch Spiegelungen Artefakte in der Nähe oder auf der Linie auftreten. Zusätzlich ist die Laserlinie durch den Effekt des Laserspeckle verrauscht.

Zwei geeignete Verfahren zur Segmentierung von linienförmigen Objekten, das Feder-Masse-Modell und das Modell der Snakes, sollen dazu näher betrachtet und umgesetzt werden.

Die Aufgabe gliedert sich in folgende Schritte:

1. Das Feder-Masse-Modell implementieren.
2. Das Modell der Snakes implementieren.
3. Die beiden Modelle erproben und vergleichen.
4. Das am besten geeignete Modell bzgl. der Aufgabenstellung wählen.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Studienarbeit stellt das Lösungskonzept dar und teilt sich im weitergehenden Teil in folgende Kapitel:

Kapitel 2 schliesst an dieses Kapitel an und erläutert die Grundlagen dieser Arbeit. Dazu gehören der Versuchsaufbau, eine Betrachtung von Testbildern, sowie ein Überblick über die modellbasierte Segmentierung und die weiterführenden theoretischen Grundlagen des Feder-Masse-Modells und des Modell der Snakes.

Kapitel 3 beschreibt das Konzept für die Segmentierung der Laserlinie. Dazu gehört die Beschreibung der verwendeten Komponenten der Modelle, der automatischen Modellgenerierung aus aufgenommenen Bildern, der Parametrisierung der Modelle und der Optimierungen der Laufzeit.

Kapitel 4 geht auf die Umsetzung des Konzepts ein.

Kapitel 5 evaluiert die Ergebnisse. Hier werden Segmentierungsqualität, Laufzeit und allgemeines Handling beider Modelle analysiert. Zudem wird ein Vorschlag für das am besten geeignete Modell für die Segmentierung gegeben.

Kapitel 6 fasst die Arbeit zusammen und bietet einen Ausblick.

1.4 Anmerkungen zur Arbeit

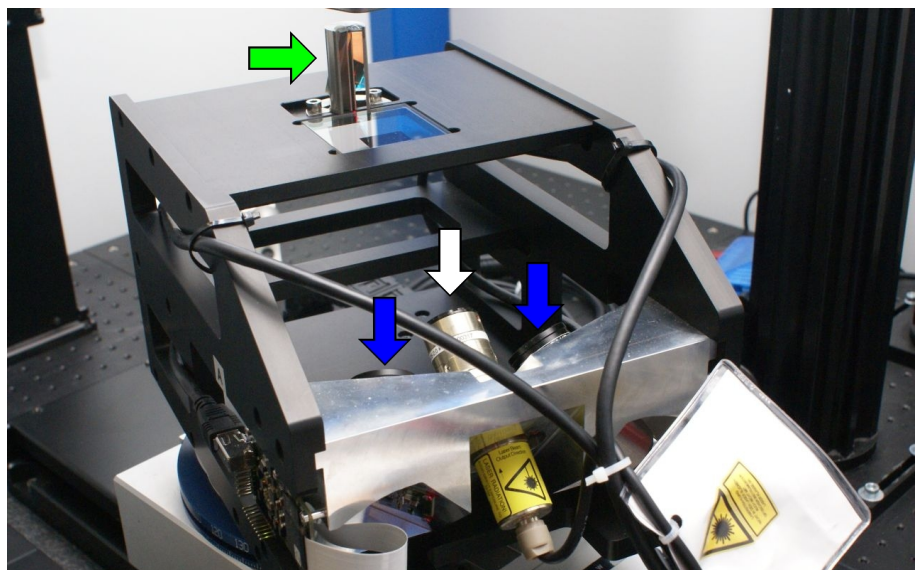
Die vorliegende Studienarbeit entstand im Rahmen eines Berufspraktikums am Fraunhofer Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung in Magdeburg. Sie dient der Vorbereitung einer automatischen Belichtungssteuerung. Die in dieser Arbeit beschriebene Segmentierung der Laserlinie stellt dabei den ersten Schritt dar. Basierend darauf soll eine Bewertung der segmentierten Linie vorgenommen werden. Anhand des Ergebnisses wird ggfs. eine neue Aufnahme mit anderer Belichtungszeit veranlasst, um eine geeignetere Aufnahme der Laserlinie für das Verfahren der Profilmessung zu erzeugen.

Dieses Kapitel beschreibt im ersten Abschnitt die Grundlagen des Versuchsaufbaus und das daraus ableitbare Basiswissen für die Segmentierung. Danach werden mittels Versuchsaufbau erstellte Testbilder vorgestellt und ihre Problematiken dargelegt. Der darauf folgende Abschnitt beschreibt den generellen Ansatz der modellbasierten Segmentierung und die Wahl dieses Ansatzes für die Lösung der Segmentierungsaufgabe. Danach erfolgt die Beschreibung der Grundlagen von 2 Modellen, die in dieser Arbeit umgesetzt werden sollen, zuerst wird das Feder-Masse-Modell näher erläutert, darauf folgend das Modell der Snakes.

2.1 Versuchsaufbau

Das optische Messsystem besteht aus einem Lasergenerator, zwei Kameras und einem zylindrischen Messkopf mit Spiegel. Die folgende Abbildung 2.1 zeigt einen Prototyp.

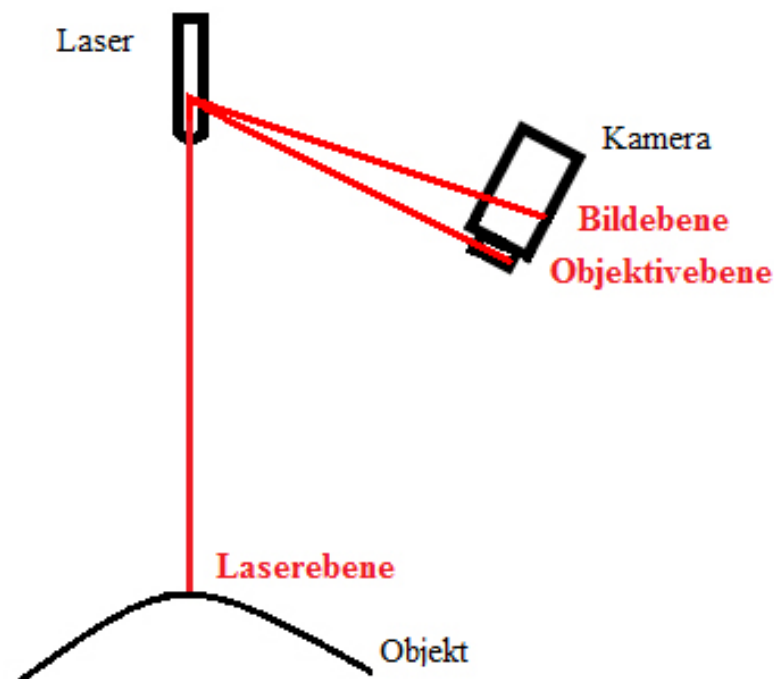
Abbildung 2.1: Aufnahme des prototypischen Messsystems. Der weiße Pfeil zeigt den Lasergenerator, die blauen Pfeile zeigen die beiden Kameras und der grüne Pfeil den Zylinderkopf mit Spiegel.



Bei dem hier verwendeten Laserlichtschnittverfahren wird, mittels eines Lasers mit Aufweitungsoptik, eine Laserlinie auf die Oberfläche des zu messenden Objektes projiziert. Diese wird durch zwei Kameras aufgenommen. Die Kurvenform der abgebildeten Linie entspricht dabei dem Höhenverlauf der Oberfläche. Der Einsatz von zwei Kameras bietet mehrere Vorteile. Zum einen werden Verdeckungen auf der Objektoberfläche berücksichtigt (Laserlinie nur von einer Kamera sichtbar). Des Weiteren soll vermieden werden, dass der Beobachtungswinkel gleich dem Reflexionswinkel des Lasers ist und so ein übersteuertes Bild der Laserlinie entsteht, oder dass im Bereich einer Ecke der Innenkontur in extrem flachen Winkeln gemessen werden muss, was ein unterbelichtetes Bild der Laserlinie zur Folge hat. Der Zylinderkopf besitzt drei Spiegel und lenkt den Strahlengang des Lasers und der beiden Kameras um. Dieser wird bei der Messung von Innenkonturen z. B. Brillenfassungen benötigt. Da eine schräge Messung von außen durch Verdeckungen von Schmuckelementen nicht möglich ist, wird der Zylinderkopf in die Brillenfassung eingeführt und so eine erfolgreiche Messung gewährleistet.

Eine Besonderheit des Versuchsaufbaus ist die Anordnung der Kameras und des Laserprojektors anhand der Scheimpflugschen Regel. Die folgende Abbildung 2.2 zeigt ein Schema.

Abbildung 2.2: Schematische Anordnung von Lasergenerator und einer Kamera, basierend auf Scheimpflugscher Regel.



Die Scheimpflugsche Regel besagt, dass sich Bild-, Objektiv- und Schärfenebene (hier Laserebene) in einer Geraden schneiden. Wird diese Bedingung eingehalten, so wird die Laserebene mit maximaler Schärfe auf die Bildebene abgebildet. Bei konventionellen Kameras sind Bildebene und Objektivebene parallel angeordnet. Für das bestehende System wurden zwei Kameras verwendet und die Lage der Bildfläche (CCD-Chips) zum Objektiv dem entsprechend angepasst. Anhand der bekannten Größen der Versuchsanordnung (Kamera- und Lasereigenschaften, Position und Winkel der Kamera relativ zum Laser) und der aufgenommenen Bilder kann mittels Triangulationsverfahren aus der Computer Vision ein 3D-Höhenverlauf des Objektes berechnet werden [KKS96].

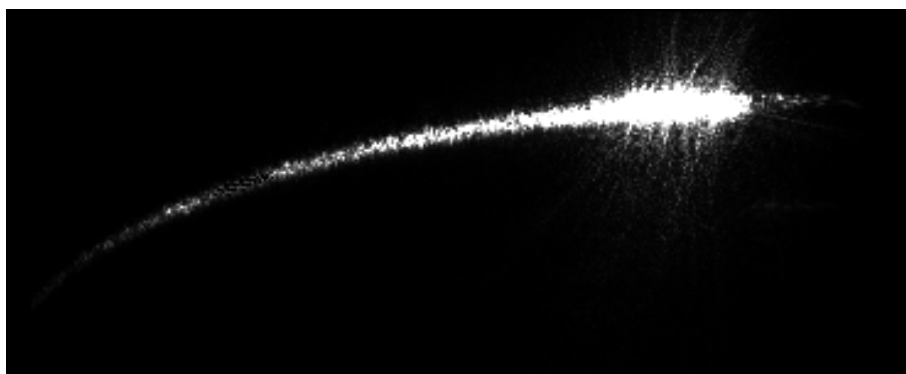
Des Weiteren ist durch die Anordnung die zu erwartende Lage der Laserlinie bekannt (horizontale oder vertikale Ausrichtung im Bild).

Durch den Einsatz eines Lasers ergeben sich folgende spezifische Eigenschaften. Die Laserlinie ist durch die Kohärenz der Laserstrahlen sehr stark fokussierbar. Durch das Laserspeckle werden die Laserlinien nur verrauscht abgebildet. Dieser Effekt tritt auf, wenn raue Oberflächen durch kohärente Strahlen beleuchtet werden und die Oberflächenrauheit in der Größenordnung der Wellenlänge des Lichtstrahls ist. Die aufgenommene Laserlinienintensität ist abhängig vom Material des zu messenden Objekts. So kann es bei Materialveränderungen der Oberfläche zu sichtbaren Brüchen der Laserlinie im aufgenommenen Bild kommen. Bei Objekten mit transparentem Material können zudem Mehrfachreflexionen auftreten. Hier werden Lichtstrahlen nicht sofort an der Oberfläche reflektiert. Ein Teil der Strahlen dringt in das Material ein, bevor sie reflektiert werden. Dies ist im aufgenommenen Bild durch Abbildung mehrerer Laserlinien sichtbar. Für eine Berechnung des Höhenverlaufs des Objektes muss die Laserlinie deutlich im Bild erkennbar sein und sich vom Hintergrund abgrenzen. Dies wird ermöglicht durch eine Veränderung der Belichtungszeit der Kamera bzw. der Intensität des erzeugten Laserlichts. Im nächsten Abschnitt werden, mittels Versuchsaufbau, erzeugte Aufnahmen von Laserlinien vorgestellt.

2.2 Testbildsatz

Für die Arbeit wurde ein Testbildsatz zur Verfügung gestellt. Im Folgenden sind Beispielaufnahmen zu sehen, um die auftretenden Problematiken visuell zu verdeutlichen. Die erste Abbildung 2.3 zeigt die Laserlinie einer Kugel.

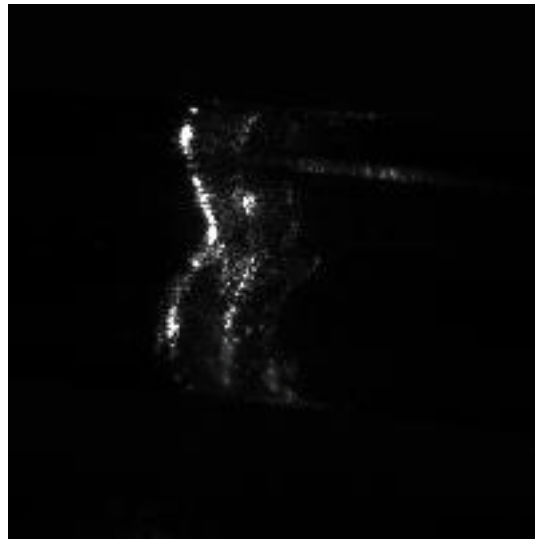
Abbildung 2.3: Die erste Aufnahme zeigt die Laserlinie einer Kugel mit teilweise über- und unterbelichteter Stelle.



An der Bildaufnahme ist zu sehen, dass sich die abgebildete Laserlinie deutlich von ihrem Hintergrund abhebt. Die Helligkeitsverteilung der Laserlinie in einer Bildzeile/-spalte entspricht theoretisch einer Gauß-Verteilung. Praktisch ist diese jedoch durch im Bild sichtbare Effekte gestört. Zunächst ist der Effekt des Laserspeckle sichtbar, d. h. die Liniendarstellung ist verrauscht. Ein weiterer Effekt ist die teilweise überbelichtete Linie, dadurch ist die Spitze der Helligkeitsverteilung nicht mehr eindeutig ermittelbar. Zudem tritt Unterbelichtung auf, die Linie zeigt an diesen Stellen Unterbrechungen.

Ein weiteres Bild 2.4 zeigt einen sehr schwierigen Fall, dies ist die Laserlinie einer Brillenfassung.

Abbildung 2.4: Die zweite Aufnahme zeigt die vertikale Laserlinie einer Brillenfassung mit vielen Unterbrechungen und Sekundärreflektionen auf der rechten Seite.



Dieses Bild zeigt eine vertikale Laserlinie mit vielen Unterbrechungen. Zudem zeichnen sich Sekundärreflektionen auf der rechten Seite ab. Diese entstehen durch transparente Materialien.

Die Erkennung der Laserlinie benötigt ein robustes Verfahren, welches mit den dargestellten Effekten umgehen kann.

2.3 Segmentierung von Objekten

Ein Verfahren zur Objekterkennung zerlegt ein Bild in Segmente, um ein Objekt von seiner Umgebung zu extrahieren. Dieser Prozess wird als Segmentierung bezeichnet. Es existieren viele Verfahren zur Segmentierung. Es gibt pixel-, kanten-, regionen- und modellbasierte Verfahren [Jäh05]. Die pixel-, kanten- und regionenbasierten Verfahren nutzen lokale Informationen der Pixel (u. a. Intensitätswert, Gradient, Punktmengen). Die modellbasierten Verfahren nutzen eine vorab bekannte Form des Objektes. Des Weiteren gibt es texturbasierte Verfahren. Diese nutzen Oberflächenmuster.

In dieser Arbeit soll eine Laserlinie segmentiert werden. Aufgrund der auftretenden Störeffekte sind Verfahren, die nur lokale Informationen benutzen weniger geeignet. Hier können z. B. bei Unterbrechungen der abgebildeten Laserlinie einige Pixel nicht der Laserlinie zugeordnet werden. Zudem ist dort keine Information für ein texturbasiertes Verfahren vorhanden. An diesen Stellen sind globale Informationen nötig. Bei den modellbasierten Verfahren sind diese vorhanden. Betrachtet man die Aufgabenstellung, so lässt sich das zu suchende Objekt durch ein Linienmodell beschreiben. Für die Segmentierung soll daher ein modellbasiertes Verfahren für die robuste Erkennung der Laserlinie genutzt werden.

Da die Laserlinie ein Profil abbildet, sollen Deformationen des Modells erlaubt sein. Deformierbare Modelle lassen sich basierend auf [AZT03] in 3 Klassen einteilen:

- Statistische Modelle werten basierend auf Trainingsbildern die Varianz einer Form statistisch aus.
- Strukturelle Modelle nutzen Zusammenhänge zwischen Einzelkomponenten eines Modells.
- Dynamische Modelle verwenden Glattheitsbedingungen für Modelle.

Für die Aufgabenstellung ist das dynamische Modell eine gute Wahl. Ein strukturelles Modell ist hier weniger geeignet, da eine Laserlinie wenige differenzierbare Teilkomponenten besitzt. Das statistische Modell ist weniger geeignet, da es vorab zum Training viele Daten benötigt. Ein dynamisches Modell kann mit wenig Aufwand beschrieben und umgesetzt werden.

Im Bereich der Segmentierung mittels dynamischer Modelle sind das Modell der Snakes [KWT88] und das Feder-Masse-Modell (z. B. beschrieben in [Ben04]) bekannt. Das Modell der Snakes wurde bereits erfolgreich z. B. für Objekterkennung [Bak07] oder Bewegungsverfolgung [HL96] eingesetzt. Das Feder-Masse-Modell wurde bereits erfolgreich in der medizinischen Bildverarbeitung z. B. für Segmentierung von Herzventrikeln [Dor05] und Lymphknoten [SDP06] eingesetzt. Daher sollen in dieser Arbeit diese beiden Verfahren für die Segmentierung der Laserlinie implementiert und miteinander verglichen werden. Der nächste Abschnitt widmet sich den Grundlagen des Feder-Masse-Modells.

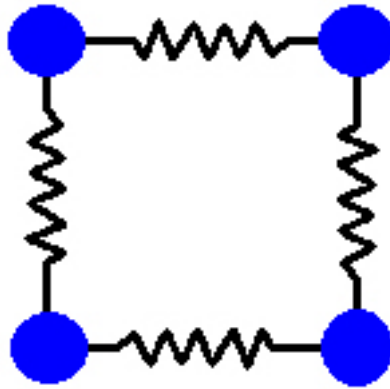
2.4 Feder-Masse-Modell

Das Feder-Masse-Modell basiert auf physikalischen Grundlagen. Der Aufbau und die Funktionsweise des Modells wurden bereits in den Arbeiten von [Ben04] und [Dor05] detailliert beschrieben. Daher werden im Folgenden, basierend auf diesen Arbeiten, nur die für diese Arbeit wichtigen Elemente zusammengefasst beschrieben.

2.4.1 Modellaufbau

Die Grundlage dieses Modells ist das physikalische Konzept eines Feder-Masse-Systems. Dieses System besteht aus Massen (im Feder-Masse-Modell durch Massepunkte bezeichnet), die durch elastische Federn verbunden sind. Die folgende Abbildung 2.5 zeigt einen Aufbau am Beispiel eines Vierecks.

Abbildung 2.5: Diese Abbildung modelliert als Beispiel ein Viereck. Die blauen Punkte zeigen die Massen, verbunden durch schwarz dargestellte Federn.



Die Form des zu segmentierenden Objektes kann mittels dieser Systemelemente beschrieben werden. Die Massepunkte repräsentieren Merkmale im Bild. Die Federn legen deren Topologie fest. Dabei besitzen Massepunkte verknüpfte Sensoren, um einen Bezug zu Bildmerkmalen herzustellen. Diese Merkmale können z. B. Bildintensität oder Kanten sein. Die Sensoren erzeugen die sogenannte externe Energie. Diese ist minimiert, wenn der Sensor sich entsprechend seiner Aufgabe an einem Maximum befindet (z. B. ein Intensitätssensor befindet sich bezogen auf sein Umfeld am hellsten Pixel im Bild).

Die Federn erzeugen die interne Energie. Wird eine Feder gestreckt oder gedehnt, speichert diese die Energie und versucht diese wieder abzugeben und in ihren Ruhezustand zurückzukehren.

Basierend auf der internen und externen Energie werden Kräfte erzeugt, welche die Massepunkte bewegen und das Modell dynamisch verformen. Anhand der Parameter des Modells (Massen der Massepunkte, Ruhelängen der Federn, Federkonstanten, ...) lässt sich festlegen, inwieweit eine Formvariation erlaubt ist.

Nach Festlegung der Form des zu segmentierenden Objektes soll dieses einer Bildaufnahme des Objektes zugeordnet werden. Der Ablauf dieses Segmentierungsprozesses ist im nächsten Abschnitt beschrieben.

2.4.2 Segmentierungsprozess

Der Segmentierungsprozess besteht aus dem Ausbalancieren der erzeugten Kräfte. Die Berechnung orientiert sich dabei an der Newtonschen Mechanik und ist anhand weniger Formeln möglich. Diese sind im Folgenden der Arbeit von [Dor05] entnommen und hier dargestellt.

Die erste krafterzeugende Komponente sind die elastischen Federn des Feder-Masse-Modells. Sie wirken auf den Massepunkten und erzeugen die inneren Kräfte. Die Federkraft für jede Feder kann basierend auf den Positionen \vec{s} der Sensoren an den verbundenen Massepunkten i und j , der Ruhelänge l_0 und Federkonstante k_{ij} mittels folgender Formel 2.1 berechnet werden.

$$\vec{F}_{ij} = k_{ij} * (||\vec{s}_j - \vec{s}_i|| - l_{0_{ij}}) * \frac{\vec{s}_j - \vec{s}_i}{||\vec{s}_j - \vec{s}_i||} \quad (2.1)$$

Wird eine Feder durch Bewegung mindestens eines verknüpften Massepunktes gestaucht oder gestreckt, so ist die Feder bestrebt ihre Ruhelänge zu erreichen und erzeugt eine Kraft auf alle verknüpften Massepunkte.

Die zweite krafterzeugende Komponente sind die Sensoren an den Massepunkten. Sie stellen den Bezug zu den Bildinformationen her und erzeugen die externen Kräfte F_i . Die Erzeugung dieser Kraft variiert je nach der zu suchenden Bildinformation. In [Ben04] ist als Beispiel ein Intensitätssensor aufgeführt. Er sucht seinen Umkreis nach bestimmten Intensitätswerten ab und erzeugt basierend auf der aktuellen Position den Richtungsvektor der Kraft. Die Länge des Kraftvektors wird dabei mittels der Intensität der aktuellen Position skaliert.

Mittels diskreter Zeitschritte wird nun eine Simulation des Feder-Masse-Systems berechnet, um die Kräfte auszugleichen. Hierbei wird bei jedem Zeitschritt die Geschwindigkeit der Sensoren und der verbundenen Massepunkte berechnet. Dabei ergibt sich die aktuelle Geschwindigkeit aus der vorherigen Geschwindigkeit \vec{v}_{i_t} zum Zeitpunkt t , dem Zeitschritt, den gewichteten einwirkenden Kräften und der Masse des Massepunktes. Dazu wird ein Dämpfungsfaktor d eingeführt, der das Problem des Aufschaukelns in der Simulation verhindern soll (erschwert Erreichen eines stabilen Modellzustandes). Es ergibt sich die folgende Formel 2.2.

$$\vec{v}_{i_{t+\Delta t}} = (\vec{v}_{i_t} + \frac{w_f * \sum_j \vec{F}_{ij} + w_s(i) * \vec{F}_j}{m_i} * \Delta t) * (1 - d) \quad (2.2)$$

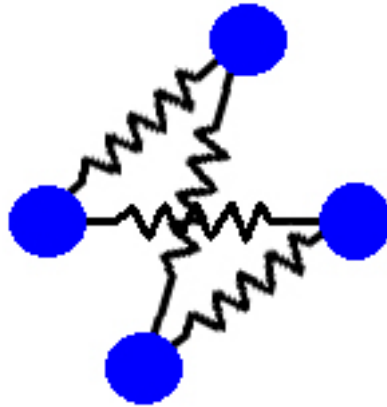
Das Modell ist somit im Gleichgewicht und der Objektabbildung zugeordnet, wenn gemäß dieser Formel keine Bewegung stattfindet.

Zusammengefasst besteht eine Iteration des Segmentierungsprozesses aus dem Berechnen der internen und externen Kräfte und der darauf basierenden Bestimmung der aktuellen Geschwindigkeit der Massepunkte und ihrer Sensoren. In der Praxis wird die Berechnung nach Erreichen eines bestimmten Kriteriums (z. B. die Summe der Bewegung aller Massepunkte liegt unterhalb eines Schwellwertes) abgebrochen und der Segmentierungsprozess gilt als abgeschlossen.

2.4.3 Stabiles Feder-Masse-Modell

Die Arbeit von [Dor05] beschreibt weiterhin, dass der im vorherigen Abschnitt geschilderte Ansatz zu Instabilitäten führen kann. Die Federn beschreiben mittels ihrer Ruhelänge die Form des Modells. Ohne einbezogene Orientierung zum Massepunkt kann dies jedoch zu instabilen Modellen führen. So können nach dem Segmentierungsprozess die Federn entspannt sein, aber das Modell entspricht mit seiner Topologie nicht mehr dem Ausgangsmodell. Dies veranschaulicht die folgende Abbildung 2.6.

Abbildung 2.6: Die Abbildung zeigt ein Modell, das nicht mehr dem Zielobjekt (Viereck) entspricht, da die Topologie verändert ist.



Zur Lösung dieses Problems führt er eine weitere interne Kraft ein, die sogenannte Torsionskraft.

Bei dieser Erweiterung werden die Ruherichtungen der Federn relativ zu den Massen gespeichert. Ändert sich im Verlauf des Segmentierungsprozesses die Richtung der Feder in Bezug auf die Ruherichtung, so wird eine Gegenkraft erzeugt, welche die Feder zurück zu ihrer ursprünglichen Richtung drückt. Dieser Ansatz erhöht die Stabilität deutlich und wird daher als stabiles Feder-Masse-Modell bezeichnet.

Diese Erweiterung wird in dieser Arbeit verwendet. Wird im Folgenden das Feder-Masse-Modell genannt, so ist hier immer das stabile Feder-Masse-Modell gemeint.

In diesem Abschnitt wurde zusammenfassend das Feder-Masse-Modell vorgestellt. Der nächste Abschnitt widmet sich dem Snake-Modell.

2.5 Snake-Modell

Das Snake-Modell basiert auf einem Ansatz, der erstmalig in [KWT88] vorgestellt wurde. Dieser ist dort als 'Snakes' bzw. 'Active Contour Model' bezeichnet. Im Folgenden werden die für diese Arbeit wichtigen Grundlagen zusammengefasst.

2.5.1 Modellaufbau

Das Modell besteht aus einer Kontur, beschrieben durch Kontrollpunkte (im Folgenden als Snake-Punkte bezeichnet) und der durchgehenden parametrischen Kurve (Spline). Diese wird durch eine Energiefunktion definiert, bestehend aus interner und externer Energie. Die interne Energie basiert auf der Form der Kurve, diese legt dem Spline eine Glättung auf. Somit wird eine gewisse Steifigkeit der Kontur erzeugt. Die externe Energie stellt den Bezug zu den Bildinformationen her. Sie bewegt das Modell zu bestimmten Bildmerkmalen, z. B. zu bestimmten Intensitätswerten oder Kanten. Aufgrund des Modellaufbaus und dem Verhalten des deformierbaren Modells bildete sich für diesen Ansatz der Name „Snakes“.

Beschreibt man die Snake anhand der Snake-Punkte $v(s)$, so ist die Energiefunktion wie folgt beschrieben (entnommen aus [KWT88]).

$$E_{snake}^* = \int_0^1 E_{int}(v(s)) + E_{image}(v(s)) + E_{cont}(v(s)) \quad (2.3)$$

Hierbei bezeichnet E_{int} die interne Energie des Splines basierend auf der Krümmung, E_{image} die Energie basierend auf Bildkräften und E_{cont} die Energie basierend auf externen Bedingungen.

Die interne Energie E_{int} wird weiter durch die folgende Gleichung 2.4 beschrieben.

$$E_{int} = (\alpha(s)|v_s(s)|^2 + \beta(s)|v_{ss}(s)|^2)/2 \quad (2.4)$$

Diese Gleichung besteht aus einem Term erster Ordnung (der durch $\alpha(s)$ gewichtet wird) und einem Term zweiter Ordnung (der durch $\beta(s)$ gewichtet wird). Der erste Term steuert das Verhalten der Snake wie eine Membran und der zweite Term das Verhalten wie eine dünne Platte.

Die Bildenergie E_{image} wird als Summe aus drei gewichteten Energien bestimmt:

$$E_{image} = w_{line}E_{line} + w_{edge}E_{edge} + w_{term}E_{term} \quad (2.5)$$

Die erste Energie E_{line} ordnet einer Bildintensität einen bestimmten Energiewert zu, der zweite Energiewert E_{edge} basiert auf Bildkanten und der dritte Energiewert E_{term} basiert z. B. auf Ecken in der Kontur.

Die Energie E_{cont} ordnet externen Bedingungen eine Energie zu, so kann z. B. ein Snake-Punkt an eine bestimmte Bildposition gebunden werden.

Nachdem das Modell durch die Energiefunktion beschrieben ist, soll dieses einer Bildaufnahme des Objektes zugeordnet werden. Dieser Prozess wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

2.5.2 Segmentierungsprozess

Der Segmentierungsprozess besteht aus dem Minimieren der Energie der Snake. In [KWT88] wird dazu ein Verfahren vorgeschlagen, dass auf der Variationsrechnung basiert.

Beschreibt man die externe Energie E_{ext} durch $E_{ext} = E_{image} + E_{cont}$ und legt die Wichtungsparameter α und β in der internen Energie bei allen Snake-Punkten als konstant fest, so ist die Energiefunktion 2.3 minimiert, wenn folgende zwei unabhängigen Eulergleichungen 2.6 und 2.7 erfüllt sind.

$$\alpha x_{ss} + \beta x_{ssss} + \frac{\partial E_{ext}}{\partial x} = 0 \quad (2.6)$$

$$\alpha y_{ss} + \beta y_{ssss} + \frac{\partial E_{ext}}{\partial y} = 0 \quad (2.7)$$

Der Artikel von [KWT88] approximiert deren Ableitungen mittels endlichen Differenzen und führt diese in ein System von Gleichungen über, die in Matrixform beschrieben werden (2.8 und 2.9).

$$Ax + f_x(x, y) = 0 \quad (2.8)$$

$$Ay + f_y(x, y) = 0 \quad (2.9)$$

Die Matrix A bildet die internen Kräfte auf die Snake-Punkte ab. Die Anzahl der Zeilen und Spalten entspricht der Anzahl an Snake-Punkten in der Kontur. Der Aufbau ist mit $a_1 = \beta$, $a_2 = -(\alpha + 4\beta)$, $a_3 = 2\alpha + 6\beta$ wie folgt (Beispiel für geschlossene Kontur):

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_3 & a_2 & a_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & a_1 & a_2 \\ a_2 & a_3 & a_2 & a_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & a_1 \\ a_1 & a_2 & a_3 & a_2 & a_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_2 & a_3 & a_2 & a_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & a_1 & a_2 & a_3 & a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & a_1 & a_2 & a_3 & a_2 & a_1 \\ a_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & a_1 & a_2 & a_3 & a_2 \\ a_2 & a_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & a_1 & a_2 & a_3 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Die Funktionen $f_x(x, y)$ und $f_y(x, y)$ bilden die externen Kräfte auf die Snake-Punkte ab, sie sind die Ableitung der externen Energien. Wird diese nur aus der Bildintensität bestimmt und die Snake soll sich zu einem Maximum bewegen, so basieren diese Funktionen auf den Intensitätsgradienten an den jeweiligen Snake-Punkten.

Zur Lösung der Gleichungen 2.8 und 2.9 wird weiter eine Schrittweite γ für eine zeitliche Ableitung der Positionen der Snake-Punkte eingeführt und die Gleichungen werden umgeformt, um die aktuellen Positionen der Snake-Punkte in Bezug auf die vorherige Iteration zu berechnen. In den folgenden Formeln 2.11 und 2.12 bezeichnen die neu eingeführten Parameter x_t und y_t die Position des Snake-Punkts zum aktuellen Zeitpunkt, x_{t-1} und y_{t-1} die Position zum vorherigen Zeitpunkt und I eine im Umformungsprozess hinzugefügte Identitätsmatrix.

$$x_t = (A + \gamma I)^{-1}(\gamma x_{t-1} - f_x(x_{t-1}, y_{t-1})) \quad (2.11)$$

$$y_t = (A + \gamma I)^{-1}(\gamma y_{t-1} - f_y(x_{t-1}, y_{t-1})) \quad (2.12)$$

Hier ist die Matrix $A + \gamma I$ eine pentagonale Bandmatrix, deren Invertierung kann in $O(n)$ berechnet werden [KWT88].

Zusammengefasst besteht der Segmentierungsprozess aus Iterationen, bei denen die Gleichungen 2.11 und 2.12 für die Berechnung der aktuellen Lage der Snake angewendet werden. Diese Iterationen können nach einem bestimmten Abbruchkriterium beendet werden (z. B. wenn eine bestimmte Anzahl von Iterationen erreicht wurde).

Eine der Problematiken des Snake-Modells sind fehlende Kriterien (z. B. bestimmte Abstände von Punkten) die ein Schrumpfen des Modells während

der Iterationen verhindern. Daher wurde im weiteren Verlauf ein zweiter Ansatz zur Minimierung der Energie, basierend auf dem Ansatz der dynamischen Programmierung, vorgestellt [ATW88]. Dieser ermöglicht die Einführung von "hard constraints" (nicht verletzbare Beschränkungen, z. B. bestimmte Abstände von Punkten), besitzt aber eine deutlich höhere Laufzeit. Dieser Ansatz wird hier nicht näher betrachtet, da später ein Greedy-Ansatz vorgestellt wurde, der die hier genannten Problematiken der ersten beiden genannten Ansätze löst [WS92].

Der Greedy-Ansatz besteht vereinfacht aus folgenden Schritten:

1. Für jeden Punkt des Snake-Modells:
 - 1a. Berechne Energie an der aktuellen Position und bewege dann den Punkt in der lokalen Nachbarschaft (z. B. die umliegenden 8 Pixel an der Position des Punktes) und berechne die Energie an den jeweiligen Positionen.
 - 1b. Wähle die neue Position anhand des geringsten Energiewertes.
 - 1c. Bewege den Punkt dorthin.
2. Wiederhole den ersten Schritt bis die Anzahl der bewegten Punkte einen selbst gewählten Schwellwert unterschreitet oder eine vorgegebene Anzahl an Iterationen berechnet wurde.

Dieses Verfahren trifft lokal die optimale Entscheidung und hofft auf eine globale optimale Lösung.

2.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen dieser Arbeit vorgestellt. Zunächst wurde der Versuchsaufbau beschrieben und die für diese Arbeit wichtigen Problematiken vorgestellt. Danach wurden diese anhand von Testbildern verdeutlicht und die Schwierigkeiten bei der Segmentierung der Laserlinie benannt. Weiterhin erfolgte eine generelle Übersicht über Strategien der Segmentierung, daraus wurden zwei geeignete Modelle für die Segmentierung abgeleitet. Anschließend erfolgte die Darstellung der beiden Modelle, zuerst das Feder-Masse-Modell und im weiteren Teil das Snake-Modell. Beide Modelle zeigen im Ansatz Ähnlichkeiten, so ähnelt das Snake-Modell einer 1D-Version des Feder-Masse-Modells mit ähnlichen Parametern (z. B. Torsionskraft im Feder-Masse-Modell zu Steifigkeitsbedingung im Snake-Modell). Diese Arbeit soll beide Modelle umsetzen und das am besten geeignete Modell bzgl. der Aufgabenstellung wählen.

Basierend auf den vorgestellten Grundlagen wird im folgenden Kapitel das Konzept für die Segmentierung der Laserlinie vorgestellt.

Dieses Kapitel entwickelt und beschreibt die modellbasierte Segmentierung der Laserlinie, basierend auf dem Snake-Modell und dem Feder-Masse-Modell. Dazu wird zunächst fundierend auf beiden Ansätzen der Aufbau eines Linienmodells beschrieben. Danach beschreibt ein Abschnitt die automatische Generierung des Linienmodells aus einer Bildaufnahme. Dieser Teil und der folgende Abschnitt für die Parametrisierung beider Modelle bilden das Konzept für eine automatische Segmentierung. Abschließend werden Methoden für eine Laufzeitoptimierung der beiden Modelle vorgestellt.

3.1 Linienmodell

In diesem Abschnitt werden zunächst die Linienmodelle auf Basis des Feder-Masse- und Snake-Modells entwickelt und vorgestellt.

3.1.1 Linienmodell auf Basis des Feder-Masse-Modells

Das verwendete Linienmodell nutzt Massepunkte mit je einem verbundenen Intensitätssensor, der die Kräfte zu den hellen Bereichen des Laserlinienbildes erzeugt. Diese Massepunkte werden durch Federn verbunden. Mit Hilfe von Torsionskräften wird die Form des Modells erhalten und es werden mittels Gewichtung kleinere Deformationen erlaubt. Die Laserlinie bildet einen Höhenverlauf ab, daher sollen kleine Biegungen erlaubt sein. Zudem erlaubt dies eine gewisse Steifigkeit des Modells, falls Sensoren bei Unterbrechungen in der abgebildeten Laserlinie keinen Bezug zu Bildinformationen herstellen können. Die folgende Abbildung 3.1 zeigt als Beispiel ein Linienmodell.

Abbildung 3.1: Die Abbildung zeigt ein Linienmodell, erzeugt auf Grundlage des Feder-Masse-Modells. Die roten Pfeile repräsentieren die Ruherichtungen der Federn.



Der an den jeweiligen Massen gebundene Intensitätssensor tastet seine Umgebung kreisförmig ab. Er sucht Pixel, deren Intensität höher als ein bestimmter Schwellwert ist. Wird ein interessanter Pixel gefunden, so wird ausgehend von der Sensorposition ein Richtungsvektor zu diesem Pixel gebildet. Die Länge des Vektors wird mittels des Intensitätsunterschiedes zu dem Pixel unter dem Sensor skaliert. Der Sensor kann mehrere Zielpixel finden, alle gebildeten Richtungsvektoren werden summiert und durch die Anzahl der interessanten Pixel geteilt. Diese Berechnung hat einen glättenden Einfluss auf die verrauschte Laserlinienabbildung (hier ist der Linienschwerpunkt nicht immer durch maximale Intensitätswerte dargestellt).

3.1.2 Linienmodell auf Basis des Snake-Modells

Das Linienmodell auf Basis des Snake-Modells besteht aus Snake-Punkten. Die externe Energie wird an diesen Punkten durch den Intensitätsgradienten bestimmt. Vor der Gradientenberechnung wird lokal eine Glättung der Intensitätswerte mittels Gauß-Filter berechnet, um das Laserspeckle zu unterdrücken. Die interne Energie wird durch eine definierte Steifigkeit der Kontur berechnet. Diese erlaubt dem Modell zur Anpassung an die abgebildete Laserlinie eine gewisse Biegung und erzeugt eine Richtungskontinuität bei Unterbrechungen in der abgebildeten Laserlinie. Die folgende Abbildung 3.2 zeigt als Beispiel ein Linienmodell.

Abbildung 3.2: Die Abbildung zeigt ein Linienmodell, welches auf dem Snake-Modell basiert. Die Snake-Punkte sind als orange Punkte dargestellt, die verbindenden orangen Linien dienen nur zur Visualisierung der Topologie.



3.2 Modellgenerierung

Nach Beschreibung des Linienmodells erfolgt in diesem Abschnitt ein Konzept für die automatische Erzeugung eines Laserlinienmodells aus einer Bildaufnahme. Das Linienmodell soll automatisch generiert werden, da es Teil eines automatischen Segmentierungsprozesses werden soll. Bei Beginn der Segmentierung soll hierbei ein bereits der abgebildeten Laserlinie gut entsprechendes Modell generiert werden, um gute Segmentierungsqualität und kurze Programmlaufzeit zu ermöglichen. Die Erzeugung der beiden, im vorherigen Abschnitt vorgestellten Linienmodelle basiert auf demselben Ansatz, daher wird die Modellgenerierung im Folgenden für beide Linienmodelle zusammengefasst.

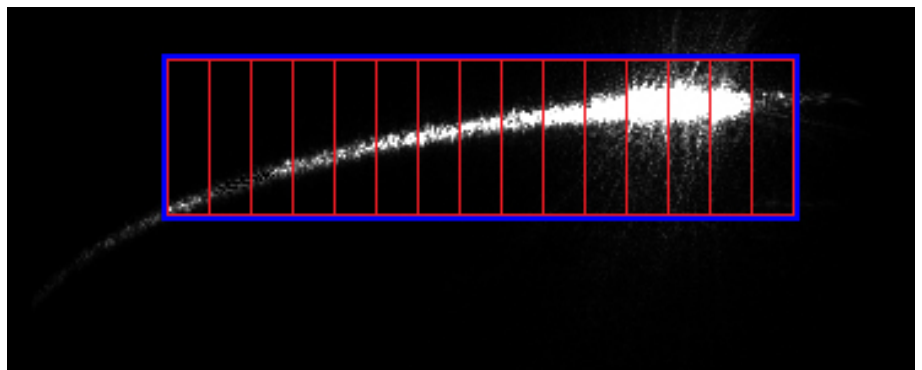
Für die Veranschaulichung der Modellgenerierung wird im Weiteren als Grundlage die Abbildung 2.3 genutzt. Im ersten Schritt wird der interessante Bildausschnitt gesucht. Basierend auf einem gegebenen Schwellwert wird die erste und letzte Bildspalte gesucht, die einen Grauwert über der Schwellwertgrenze enthält. Dies wird analog für die Bildzeilen durchgeführt. Es ergibt sich eine sogenannte Bounding Box, in der das Modell platziert werden soll.

Danach wird die Anzahl der Masse-/Snake-Punkte für das Modell aus dem Maximum folgender Variablen bestimmt:

- Ein festgelegter Minimalwert der Anzahl, z. B. 10.
- Die berechnete Anzahl von Masse-/Snake-Punkten für den Bildausschnitt, basierend auf der festgelegten Anzahl der Masse-/Snake-Punkte pro Bilddiagonale (z. B. 50) und dem Größenverhältnis vom Ausschnitt zum Gesamtbild. Dies skaliert die Anzahl zu der Bildauflösung, bei größeren Abbildungen bekommen die Modelle mehr Masse-/Snake-Punkte.

Die Masse-/Snake-Punkte werden innerhalb der zuerst gefundenen Bounding Box platziert. Hierfür wird dieser Bereich in kleinere Bereiche unterteilt (abhängig von Anzahl der Masse-/Snake-Punkte). In jedem Teilbereich soll ein Masse-/Snake-Punkt platziert werden (siehe folgendes Bild 3.3 zur Veranschaulichung).

Abbildung 3.3: Die Abbildung zeigt die die zuerst gefundene Bounding Box als blaues Rechteck. Für das Bild wurden 15 Masse-/Snake-Punkte ermittelt, jeder soll einem der Teilbereiche (rote Rechtecke) zugeordnet werden.



Für die Platzierung der Masse-/Snake-Punkte wird ein Parameter genutzt, der die Ausrichtung der Laserlinie angibt. Durch die bekannte Versuchsanordnung wird vorab ermittelt, ob die Laserlinie im Bild horizontal oder vertikal erwartet wird. Mittels dieser Information wird bei einer horizontalen Laserlinie in jedem Teilbereich, für jede Bildspalte der Mittelpunkt vom ersten und letzten Auftreten des größten Grauwertes gesucht. Nach Mittelung dieser Werte über die Anzahl der Spalten, ergibt sich die Startposition des Masse-/Snake-Punkte für den Teilbereich aus dem eben ermittelten Wert (y-Koordinate) und der Mitte des Teilbereichs (x-Koordinate). Analog wird für eine vertikal erwartete Laserlinie verfahren. Durch diese Strategie wird ein Snake-/Massepunkt bei einer überbelichteten Laserlinie bereits mittig platziert.

Sollte sich in einem Teilbereich kein großer Grauwert für die Bestimmung einer Position befinden (bzw. alle Grauwerte liegen unter dem Schwellwert, der diese nicht zur Laserlinie zuordnet), so wird ausgehend von diesem Bereich in zwei Richtungen nach Teilbereichen gesucht, in denen ein Masse-/Snake-Punkt platziert werden konnte. Mittels dieser beiden wird die Position durch

lineare Interpolation berechnet. Diese Strategie gibt dem Masse-/Snake-Punkt eine Startplatzierung im Bereich der unterbrochenen Laserlinie.

Ein Teilbereich darf außerdem eine festgelegte Größe in Pixeln nicht unterschreiten. Damit soll verhindert werden, dass für die Positionsbestimmung nur eine Bildzeile/-spalte betrachtet wird und Punktstörungen für eine schlechte Modellgenerierung sorgen. Eine festgelegte Mindestgröße (und die daraus entstehenden überlappenden Teilbereiche) wirkt dem entgegen.

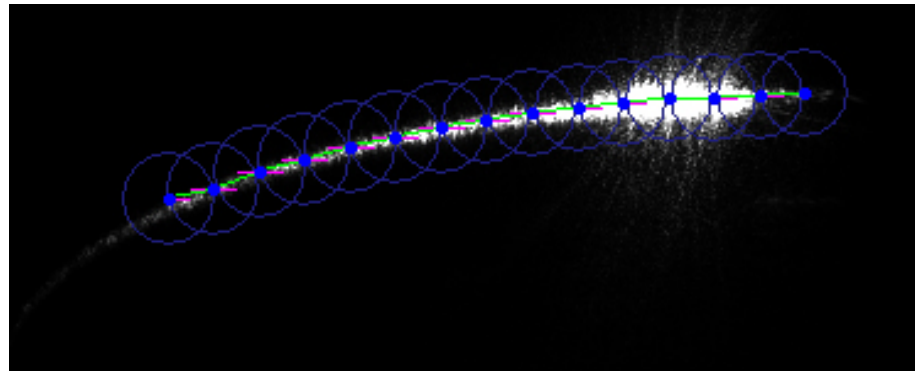
An diesem Punkt ist die Generierung des Snake-Modells abgeschlossen. Für das Feder-Masse-Modell werden zwei weitere Schritte erledigt:

1. Nach der Generierung der Massepunkte werden diese iterativ durch Federn verbunden und die Standardlänge durch die jeweiligen Abstände der beiden verbundenen Massepunkte festgelegt. Basierend auf der erwarteten horizontalen/vertikalen Laserlinie im Bild werden die Ruherichtungen der Federn festgelegt.
2. Jedem Massepunkt wird ein Intensitätssensor hinzugefügt. Die Sensorradien werden so festgelegt, dass für jeden Massepunkt die benachbarten Massepunkte innerhalb des Radius liegen und eine festgelegte Mindestgröße nicht unterschritten wird.

Durch dieses Konzept der Modellgenerierung bekommen die Masse- und Snake-Punkte dieselben Positionen und beide Linienmodelle werden an derselben Stelle initialisiert.

Anhand der hier vorgestellten Methoden bekommt das Modell bereits bei der Initialisierung eine gute Startposition und liegt nah am erwarteten Ergebnis der Linienerkennung. Folgende Abbildung 3.4 zeigt dies am Beispiel eines Linienmodells, basierend auf dem Feder-Masse-Modell.

Abbildung 3.4: Die Abbildung zeigt das automatisch generierte Modell. Die blauen Punkte stellen die Massepunkte dar, die blauen Kreise den Radius der Sensoren, die grünen Linien die Federn und die lila Linien die Ruherichtung der Federn.



Die automatische Modellgenerierung ist damit abgeschlossen, es erfolgt im nächsten Abschnitt die Beschreibung des verwendeten Segmentierungsablaufs bei beiden Modellen.

3.3 Segmentierungsprozess

3.3.1 Feder-Masse-Modell

Der Prozess der Segmentierung entspricht dem, in den Grundlagen, vorgestellten Verfahren. Bei einer Iteration wird zunächst bei jedem Massepunkt die

Kraft des assoziierten Intensitätssensors, die Kraft der verbundenen Federn und deren Torsionskraft berechnet und gespeichert. Danach wird die aktuelle Geschwindigkeit der einzelnen Massepunkte, basierend auf den anliegenden Kräften, berechnet. Der Segmentierungsprozess ist abgeschlossen, wenn die Summe der Bewegung der Massepunkte einen bestimmten Schwellwert unterschreitet.

3.3.2 Snake-Modell

Bei dem Snake-Modell werden im Segmentierungsablauf die Energien minimiert. Der eingeschränkte Zeitrahmen dieser Arbeit erlaubt nur die Umsetzung eines der im Grundlagen-Kapitel vorgestellten Minimierungsverfahren. Für die Implementierung wird die Energieminimierung mittels dem Verfahren der Variationsrechnung [KWT88] berechnet. Die Wahl basiert auf folgenden Gründen:

- In der Arbeit von [WS92] wurden der Ansatz der Variationsrechnung, das Dynamic-Programming-Verfahren und das Greedy-Verfahren implementiert und miteinander verglichen. Hinsichtlich der Qualität erzielen alle drei Verfahren vergleichbare Ergebnisse. Im Laufzeitvergleich bietet der Ansatz der Variationsrechnung im Schnitt die beste Laufzeit, dicht gefolgt vom Greedy-Verfahren. Das Dynamic-Programming-Verfahren ist das mit Abstand langsamste Verfahren, daher wird dieses nicht gewählt.
- Für die Wahl zwischen den Ansatz der Variationsrechnung und dem Greedy-Verfahren werden Kenntnisse aus einer prototypischen Implementierung des Feder-Masse-Modells genutzt. Hier zeigt sich, dass das Berechnen der Intensitätskräfte den größten Anteil an der Laufzeit hat. Aufgrund der verrauschten Laserlinie muss bei einem Intensitätssensor der betrachtete Pixel mittels einer relativ großen Nachbarschaft geglättet werden. Bei dem Greedy-Verfahren wird vorgeschlagen, dass zusätzlich zum Pixel am Snake-Punkt auch die umliegenden 8 Pixel in den möglichen Bewegungsrichtungen betrachtet werden sollen. Dies würde aufgrund der größeren Anzahl zu einer höheren Laufzeit gegenüber dem Verfahren der Variationsrechnung führen. Zudem zeigt sich bei der prototypischen Implementierung des Feder-Masse-Modells, dass die Kontrollpunkte des Linienmodells selten zu vorherigen Positionen zurückkehren. Daher kann auch eine Speicherung der Werte in der großen Nachbarschaft nicht für eine Beschleunigung der Laufzeit beim Greedy-Verfahren dienen.
- Die in der Gleichung 2.10 vorgestellte Matrix für die Variationsrechnung kann für ein Linienmodell modifiziert werden, sodass das Modell während der Iteration nicht fortwährend seine Größe verkleinert (wird im Folgenden dargestellt).

Zusammenfassend ist damit die Laufzeit das Hauptkriterium für die Wahl des Ansatzes der Variationsrechnung.

Um das genannte Zusammenziehen der Snake zu verhindern, wird die entsprechende Matrix (Gleichung 2.10) für die Iteration modifiziert. Diese ist für eine geschlossene Kontur vorgegeben. Die Bestimmung der neuen Position eines

Snake-Punktes ist dort abhängig von seinen 4 Nachbarpunkten. Für ein Linienmodell müssen daher die ersten beiden und letzten beiden Zeilen der Matrix modifiziert werden, da z. B. die Position des ersten Snake-Punktes von der Position des letzten Snake-Punktes im Modell abhängt. Diese Abhängigkeit wird entfernt, es ergibt sich mit $a_1 = \beta, a_2 = -(\alpha + 4\beta), a_3 = 2\alpha + 6\beta$ die folgende Matrix 3.1 für die Iteration.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_1 + a_2 & a_3 & a_1 + a_2 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 \\ a_1 & a_2 & a_3 & a_2 & a_1 & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_2 & a_3 & a_2 & a_1 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \cdots & 0 & 0 & a_1 & a_2 & a_3 & a_2 & a_1 & 0 \\ 0 & \cdots & 0 & 0 & a_1 & a_2 & a_3 & a_2 & a_1 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & a_1 + a_2 & a_3 & a_1 + a_2 \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Nach dieser Modifizierung reagieren die Endpunkte der Snake nur noch auf die Bildintensität. Dies verhindert ein Zusammenziehen des Modells aufgrund der internen Energie.

Zusammengefasst besteht eine Iteration des Segmentierungsprozesses aus dem Berechnen des Intensitätsgradienten an den jeweiligen Snake-Punkten und dem Anwenden der Gleichungen 2.11 und 2.12 (wobei die entsprechende Matrix A auf der Gleichung 3.1 basiert). Jede Iteration bestimmt die neuen Positionen der Snake-Punkte. Dieser Prozess wird abgebrochen, wenn die Summe der Bewegung der einzelnen Snake-Punkte einen bestimmten Schwellwert unterschreitet.

Nachdem das Linienmodell erzeugt und der Ablauf des Segmentierungsprozesses beschrieben ist, erfolgt nun eine Beschreibung für eine Methode zur Schätzung guter Werte für die einzelnen Modellparameter (Gewichtung der Intensitätskräfte, etc.).

3.4 Parametrisierung

Die Ermittlung und Festlegung der Modellparameter eines Linienmodells ist der letzte Teil für die Automatisierung des Segmentierungsprozesses. Es müssen geeignete Werte (u. a. für die Gewichtung der Steifigkeit des Linienmodells) bestimmt werden, um die Laserlinie robust und zugleich schnell zu erkennen.

Zu diesem Zweck wird bei der Implementierung eine graphische Oberfläche (GUI) entwickelt. Diese ermöglicht das Anzeigen von einer Aufnahme der Laserlinie und von einem Linienmodell. Die GUI ermöglicht die Wahl der einzelnen Modellparameter. Zudem wird der Segmentierungsprozess so dargestellt, dass man die einzelnen Iterationen steuern und das Verhalten des Modells anhand seiner Parameter beobachten kann. Dies ermöglicht eine schnelle erste Schätzung günstiger Modellparameter.

Zur weiteren Unterstützung der Parametrisierung werden Qualitätswerte angezeigt. Diese geben an, wie gut das Modell zu der abgebildeten Laserlinie passt. Die Berechnung dieser Qualitätswerte beruht auf einem Ansatz, der in [DT07]

vorgelegt wurde. In diesem wird beim Feder-Masse-Modell ein Qualitätsmaß, basierend auf den Kräften an den Intensitätssensoren und den Torsionskräften beschrieben. Die Implementierung soll folgende 4 Qualitätswerte berechnen und auf der graphischen Oberfläche anzeigen:

- Der Qualitätswert 1 bewertet die Intensität an den Kontrollpunkten des Linienmodells (beim Feder-Masse-Modell der Pixel am Intensitätssensor, beim Snake-Modell der Pixel am Snake-Punkt). Es wird die Differenz zwischen maximalen Intensitätswert im Bild und Intensitätswert an dem Kontrollpunkt ermittelt, aufsummiert und über die Anzahl der Kontrollpunkte normiert. Die Idee bei dem Ansatz ist, dass ein hoher Wert darauf hinweist, dass das Modell nicht auf der Laserlinie liegt. Dementsprechend ist die Qualität besser, je kleiner dieser Term ist.
- Der Qualitätswert 2 begutachtet die Krümmung des Linienmodells. Bei dem Feder-Masse-Modell wird dazu für jede Feder das Skalarprodukt zwischen Ruherichtung der Feder und aktueller Richtung relativ vom Massepunkt berechnet, aufsummiert und über die zweifache Federanzahl normiert. Ist bei einer Feder das Skalarprodukt kleiner 0 (Winkel größer 90 Grad), so ist das Modell an dieser Stelle geknickt und das Modell gilt als zusammengebrochen. Dieser Fall wird bestraft, indem der Qualitätswert 2 einen hohen Gesamtwert von 2 bekommt. Bei dem Snake-Modell wird ein ähnlicher Ansatz verfolgt. Es wird beim zweiten bis vorletzten Snake-Punkt jeweils der Winkel zwischen den Richtungsvektoren zu den benachbarten Snake-Punkten betrachtet. Bei einem glatten Linienmodell ist bei einem Snake-Punkt der Winkel zwischen den Richtungsvektoren zu seinen zwei Nachbarn 180 Grad. Ein Winkel kleiner als 90 Grad soll ein zusammengebrochenes Linienmodell andeuten. Der Winkel von 180 bis 90 Grad wird auf einen Bereich von $[0.0, 1.0]$ abgebildet. Dieser Wert wird bei allen Snake-Punkten berechnet und gemittelt. Ist ein Winkel kleiner 90 Grad, so legt dies den Gesamtwert von Qualitätswert 2 auf 2 fest. Damit hat der Qualitätswert 2 einen Wertebereich von $[0.0, 2.0]$. Dieser soll z. B. Aufschluss geben, ob ein Linienmodell bei vielen Unterbrechungen der Laserlinie eine glatte Darstellung zeigt. Die Qualität ist besser, je kleiner dieser Term ist.
- Der Qualitätswert 3 beurteilt die Laufzeit und ist hier gleich der benötigten Rechenzeit in Sekunden. Auch hier gilt, ein kleinerer Wert bedeutet bessere Qualität.
- Der Qualitätswert 4 ist die Summe der gewichteten Qualitätswerte 1 bis 3.

Die vorgestellten Qualitätswerte ermöglichen eine automatisierte Bewertung, wie gut das Modell zur abgebildeten Laserlinie passt. Es ist hier anzumerken, dass die Methode eine unterstützende Funktion zur Schätzung günstiger Modellparameter ist und keinesfalls als objektive Einschätzung zu sehen ist.

Weiterhin wird eine Batch-Funktion implementiert, die basierend auf einem Satz von Bildern, eine automatische Segmentierung berechnet. Es lassen sich manuell für einzelne Parameter mehrere Werte festlegen. Die Batch-Funktion berechnet Segmentierungen mit allen Parameterkombinationen, ermittelt die vier vorgestellten Qualitätswerte und speichert für jede Segmentierung die

verwendeten Parameter und die berechneten Qualitätswerte tabellarisch in einer csv-Datei. Die csv-Datei wird mit Microsoft Excel importiert und mittels Pivot-Tabellen weiterverarbeitet. Zu jedem Parameterwert werden dort die benötigte Rechenzeit und die einzelnen Qualitätswerte angezeigt. Es werden der minimale, mittlere und maximale Wert angegeben, da eine Anwendung eines Parameterwertes auf mehreren Bildern erfolgt und dieser Wert zusätzlich bei Kombinationen der Werte anderer Parameter verwendet wird. Weiterhin wird nach jeder Segmentierung ein Screenshot von dem Laserlinienbild und dem Linienmodell in einer platzsparenden png-Datei gespeichert.

Diese Batch-Funktion ist eine weitere Unterstützung für die Schätzung günstiger Modellparameter. So kann z. B. der Wertebereich von günstigen Parameterwerten eingeschränkt werden, indem man die Segmentierungen anhand des Vielfachen eines Parameterwertes berechnet und die entstehenden Qualitätswerte begutachtet. Die Eignung eines Parameterwertes kann an den erzeugten Screenshots überprüft werden.

Die hier vorgestellten Methoden der Parametrisierung sind sehr schnell implementierbar und ermöglichen eine schnelle Bestimmung der Parameterwerte. Es ist hier anzumerken, dass diese Art der Parametrisierung nur eine Möglichkeit dargestellt und es weitere Ansätze gibt [Ben04].

Eine Ermittlung geeigneter Werte für die Modellparameter sorgt bereits für eine Beschleunigung des Segmentierungsprozesses. Im folgenden Abschnitt werden weitere Methoden vorgestellt, um die Laufzeit zu verkürzen.

3.5 Laufzeitoptimierung

In der Aufgabenstellung wird auch auf einen schnellen Programmablauf Wert gelegt. Dieser Abschnitt stellt wichtige Methoden für eine Laufzeitverringern vor. Die Betrachtung der erreichten Laufzeitverkürzungen erfolgt später im Abschnitt 5.3.

Zuerst werden die Intensitätssensoren des Feder-Masse-Modells betrachtet. Diese sollen ihre Umgebung kreisförmig abtasten. Eine schnelle und leicht zu implementierende Methode ist es, den Block um den Massepunkt zu betrachten und für jeden Punkt zu berechnen, ob seine Distanz innerhalb des Sensorradius liegt. Diese Möglichkeit beinhaltet aber eine sehr teure Wurzeloperation für die Distanzberechnung. Um dies zu vermeiden, wird eine Adaption des Bresenham-Algorithmus für Kreise [BRE] angewendet. Dieser bietet mehrere Vorteile:

- Der Bresenham-Algorithmus erzeugt die Kreispunkte sehr günstig (sie bilden zeilenweise den Start und das Ende einer for-Schleife). Es entfallen teure Abstandstests von Pixeln und damit die teure Wurzeloperation.
- Pro Bildzeile ist nur eine Randbetrachtung (Test, ob Start-/Endpunkt der for-Schleife innerhalb des Bildes ist) und ein Sprungbefehl zu den Bilddaten nötig (Iteration über Bildpunkte einfach über Inkrementieren des Zeigers).

Für die Laufzeitverkürzung werden bei den Intensitätssensoren des Feder-Masse-Modells die Größen der Sensorradien zudem dynamisch verändert. Die Idee

bei dieser Methode ist Folgende: Wenn der Intensitätssensor bereits einen hohen Helligkeitswert unter sich hat, so kann er bei jeder Bewegung seinen Sensorradius verkleinern, insofern er bei der neuen Position immer noch einen hohen Intensitätswert unter sich hat. Beim Start merken sich die Intensitätssensoren ihre Startposition und ihren Sensorradius. Befindet sich unter dem Intensitätssensor ein interessanter Pixel (Helligkeit größer als ein Schwellwert, z. B. 64) wird bei jeder Iteration der Radius verkleinert (die zurückgelegte Entfernung relativ zur Startposition). Dazu wird ein Mindestwert festgelegt, den der Radius nicht unterschreiten darf (z. B. 10 Pixel). Sollte beim nächsten Iterationsschritt festgestellt werden, dass keine interessante Helligkeit unter dem Sensor ist, so wird der Sensorradius wieder auf den Startwert (Modellgenerierung) festgelegt. Somit bleibt der Radius immer gleich groß, wenn der Sensor keinen interessanten Helligkeitswert unter sich hat. Dieser Ansatz soll die Berechnung beschleunigen, wenn am Ende des Programmablaufs die meisten Sensoren auf der abgebildeten Laserlinie liegen und hauptsächlich noch innere Modellkräfte ausbalanciert werden müssen.

Der Aufwand der Intensitätskraftberechnung soll weiter durch die Einführung einer Kräftekarte gesenkt werden (basierend auf einen Ansatz in [Dor05]). Der Intensitätssensor des Feder-Masse-Modells speichert dort die Kräfte, die der Sensor an den diskreten Positionen der umliegenden Pixel erzeugt (beim dem Snake-Modell entspricht dies dem Wert des Intensitätsgradienten am Snake-Punkt). Für die Bestimmung der Kraft an der entsprechenden Subpixelposition eines Intensitätssensors/Snake-Punktes wird eine lineare Interpolation in der Kräftekarte angewendet. Es stehen 4 Kartenmodelle zur Verfügung:

- Das Kartenmodell 1 speichert lokal nur die Kraft an dem Pixel am Intensitätssensor/Snake-Punkt. Es wird keine lineare Interpolation ausgeführt (die Karte enthält nur einen Wert). Die Karte wird erst nach ganzzahliger Änderung der Position neu berechnet.
- Das Kartenmodell 2 speichert lokal die Kraft der umgebenen 4 Pixel. Für die Bestimmung der Kraft an der Subpixelposition des Intensitätssensors/Snake-Punktes wird eine bilineare Interpolation der Karte (sie enthält 2×2 Werte) durchgeführt. Bewegt sich der Intensitätssensor/Snake-Punkt und eine Kartenaktualisierung ist nötig, können unter Umständen bereits berechnete Werte genutzt werden (z. B. bei Bewegung um einen Pixel in x-Richtung, müssen nur 2 Werte der Kräftekarte neu berechnet werden).
- Das Kartenmodell 3 entspricht dem Kartenmodell 2, hat jedoch eine Karte mit 3×3 Werten für die umgebenen 9 Pixel.
- Das Kartenmodell 4 speichert die Kraft global für alle Intensitätssensoren/Snake-Punkte, d. h. die Karte hat die Größe des Originalbildes und jeder Intensitätssensor/Snake-Punkt kann Werte eintragen, bzw. eingetragene Werte nutzen.

Die Karte wird iterativ aufgebaut (und nicht vorab für jeden Pixel bestimmt), da die Anzahl der Pixel mit hohen Intensitäten relativ klein im Verhältnis zu Gesamtanzahl aller Pixel im Bild ist. Ein Test am Bilddatensatz soll das beste Kartenmodell auswählen.

Eine weitere Optimierung ist die Approximation von mathematischen Grundfunktionen. Winkelfunktionen, z. B. \sin und \cos , werden durch table lookups ersetzt. Für die Berechnung eines bestimmten Wertes wird eine einfache lineare Interpolation von zwei vorberechneten Tabelleneinträgen durchgeführt. Dabei ist darauf zu achten, die Tabelle nicht zu klein zu wählen. Die inverse Wurzelfunktion (z. B. nötig für Normalisieren von Vektoren) wird mittels "Fast inverse square root algorithm" [FIS] approximiert. Dieses Verfahren ist schneller als ein table lookup und hat einen akzeptablen maximalen Fehler von 0,175%.

Eine weitere Optimierung ist die dynamische Schrittweite (Zeitschritt im Feder-Masse-Modell bzw. γ im Snake-Modell). Die Idee bei dem Ansatz ist, z. B. bei geringer Bewegung eines Masse-/Snake-Punktes die Schrittweite zu erhöhen. Zu diesem Zweck wird nach der 1. Iteration die größte Strecke ermittelt, die ein Masse-/Snake-Punkt zurückgelegt hat. Als zweites wird der minimale Abstand berechnet, den zwei Masse-/Snake-Punkte zueinander haben. Die Schrittweite für die nächste Iteration wird dementsprechend skaliert. Dabei soll die maximale Strecke, die ein Masse-/Snake-Punkt sich bewegen kann, nicht größer als die Hälfte des minimalen Abstands von zwei Masse-/Snake-Punkten sein, da diese sonst z. B. ihre Position tauschen können und das Modell instabil wird. Eine weitere Stabilität soll durch Begrenzung des Hoch-/Herunterskalierens der Schrittweite erzeugt werden. Relativ zu der initialen Schrittweite darf diese einen bestimmten Faktor (z. B. 3) nicht überschreiten.

3.6 Zusammenfassung

Dieses Kapitel stellte das Konzept für die Segmentierung der Laserlinie vor. Zuerst wurde unter Verwendung des Grundlagen-Kapitels ein Linienmodell basierend auf dem Feder-Masse-Modell und dem Snake-Modell hergeleitet. Danach erfolgte die Beschreibung einer Methode, mit der automatisch ein Linienmodell aus Bilddaten erzeugt werden kann. Weiterführend wurde der anzuwendende Segmentierungsprozess auf Basis des Feder-Masse- und Snake-Modells geschildert und eine Methode für die Wahl geeigneter Parameter für das Linienmodell präsentiert. Abschließend erfolgte die Beschreibung von Methoden für eine weitere Verkürzung der Laufzeit.

4

Implementierung

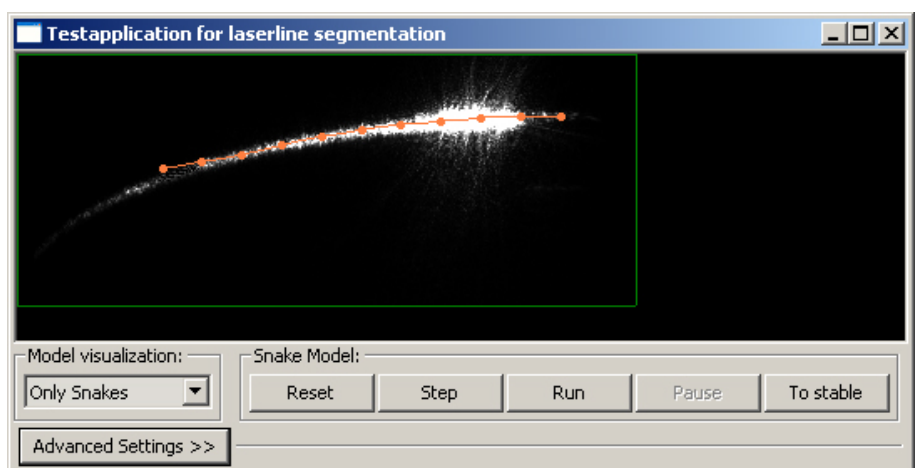
Dieses Kapitel betrachtet die Implementierung des entwickelten Konzeptes.

Das Konzept wurde mittels C++ umgesetzt. Für eine graphische Oberfläche wird die plattformübergreifende Bibliothek wxWidgets [wxW] genutzt. Die Implementierung und Programmtests wurden auf einem Rechner, bestehend aus einem Intel Core 2 mit 2,4 GHz, 3 GB RAM und Windows XP als Betriebssystem, vorgenommen.

Die Klassenstruktur ist modular aufgebaut, diese trennt die Klassen für das Snake- und Feder-Masse-Modell und die Klassen für die graphische Oberfläche. Desweiteren sind die Klassen für die Modelle unabhängig von anderen Bibliotheken und lassen sich leicht in ein anderes Framework (z. B. das interne Framework vom Fraunhofer IFF) integrieren.

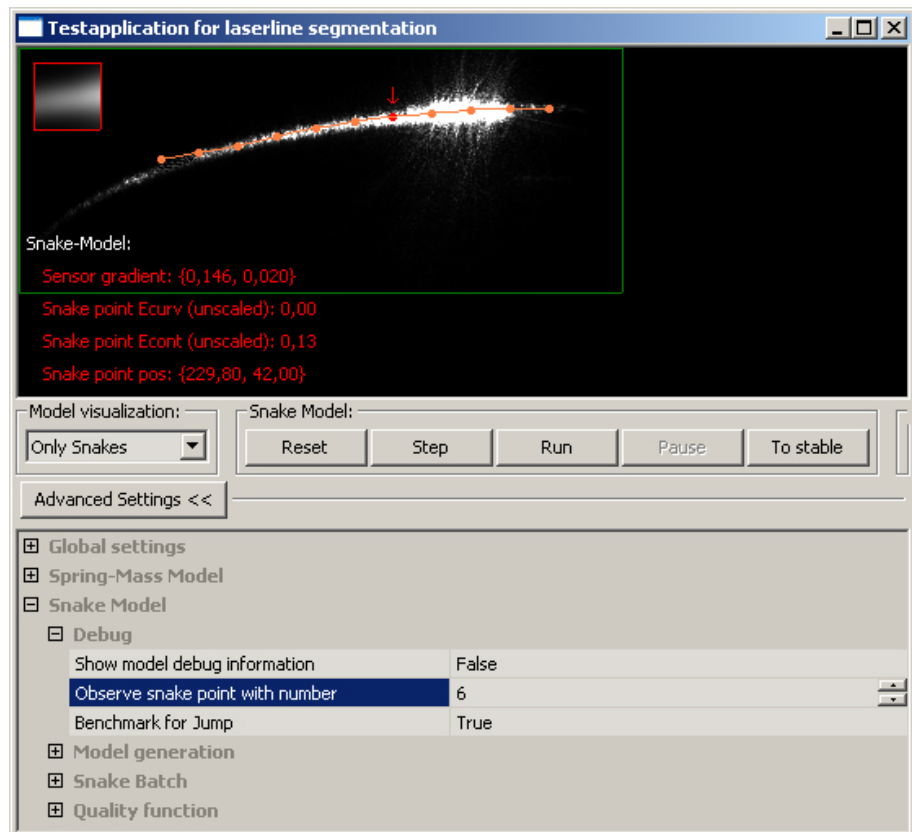
Es wurde ein Programm entwickelt, welches die Klassen der einzelnen Modelle an eine graphischen Benutzeroberfläche bindet. Diese erlaubt das Betrachten der implementierten Modelle und unterstützt den Benutzer bei einer Parametrisierung des Linienmodells. Dabei bietet die Umsetzung mit C++ die nötige schnelle Performance für die Interaktion mit der graphischen Benutzeroberfläche. Die folgende Abbildung 4.1 zeigt das erstellte Programm.

Abbildung 4.1: Die Abbildung zeigt einen Screenshot des entwickelten Programmes.



In dem Programm ist eine Bildvorschau implementiert, die das Bild einer Laserlinie und einem Linienmodell zeigt (in der obigen Abbildung als Beispiel das Snake-Modell). Es sind Funktionen für die Betrachtung des Segmentierungsprozesses integriert (mittels Buttons kontrollierbar), so sind u. a. einzelne Iterationen steuerbar. Zudem erlaubt die Oberfläche eine Wahl des angezeigten Linienmodells (Linienmodell basierend auf Feder-Masse-Modell und/oder Linienmodell basierend auf Snake-Modell). Dies ermöglicht einen Vergleich der beiden Linienmodelle. Eine Schaltfläche „Advanced Settings“ gibt weitere, implementierte Funktionen frei. So sind z. B. Debug-Ausgaben zuschaltbar, die dem User das Modellverhalten näher bringen (siehe Abbildung 4.2).

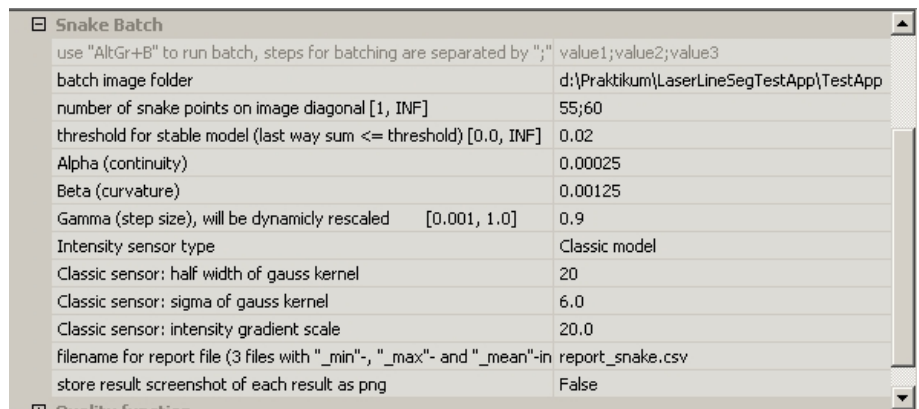
Abbildung 4.2: Die Abbildung zeigt die ausklappbaren, weiteren Optionen. Hier werden bei einem Snake-Punkt Debug-Informationen angezeigt. So lassen sich Werte einzelner Modellkomponenten analysieren.



Die erweiterten Einstellungen enthalten zudem Funktionen, die eine Festlegung einzelner Modellparameter erlauben. Dies erlaubt dem Nutzer, das Zusammenwirken zwischen Werten der Modellparameter und den Ablauf der Segmentierung zu verfolgen und so eine günstige Parameterwahl für ein Linienmodell zu schätzen.

Zusätzlich ist in den erweiterten Einstellungen die Batch-Funktion integriert, die basierend auf einen Satz von Bildern die Segmentierungen durchführt und deren Ergebnisse speichert (als Unterstützung für die Parametrisierung der Linienmodelle). Dies zeigt die folgende Abbildung 4.3.

Abbildung 4.3: Die Abbildung zeigt die Batch-Funktion des entwickelten Programms. Hier werden für die zu testenden Parameter des Modells verschiedene Werte angegeben (Trennung erfolgt über ';'). Es lassen sich der Ordner mit den Bilddaten, Modellparameter und die Speicherung der Ergebnisse festlegen.



Die Anzahl der zu testenden Parameter muss sorgfältig gewählt werden, da mit jedem weiteren Wert die Zahl der durchzuführenden Segmentierungen exponentiell steigt. Des Weiteren ist bei der Segmentierung ein Timeout implementiert. Eine Segmentierung wird abgebrochen, wenn sie länger als 10 sec. dauert (Kriterium eines schnellen Verfahrens kann nicht mehr erfüllt werden). Auf dem Testsystem können mit dieser Funktion, je nach Wahl der Parameter und den daraus resultierenden Timeouts, mehrere tausend Segmentierungen pro Stunde berechnet werden.

5

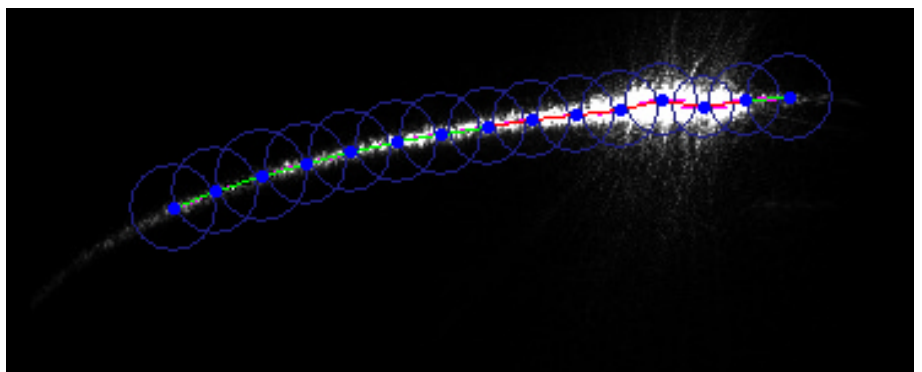
Evaluierung der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die erreichten Ergebnisse der Implementierung des Feder-Masse-Modells und des Snake-Modells zusammengetragen und analysiert. Es erfolgt zunächst ein Vergleich der Segmentierungsqualität beider Modelle. Danach werden die Laufzeiten verglichen, sowie die umgesetzten Laufzeitoptimierungen ausgewertet. Der darauf folgende Abschnitt betrachtet das allgemeine Handling beider Modelle, insbesondere die Parametrisierung des Linienmodells. Abschließend werden einige Grenzen der umgesetzten Verfahren aufgezeigt und ein Vorschlag für das beste Modell für den praktischen Einsatz der Segmentierung gegeben.

5.1 Vergleich der Segmentierungsqualität

Die Segmentierungsqualität wird zunächst an der Bildaufnahme der Kugel (Abbildung 2.3) betrachtet. Hier zeigt sich, dass bereits nach der Modellgenerierung das Modell, trotz der Störung durch Überbelichtung, sehr nah auf der Laserlinie platziert wird (Abbildung 3.4). Problematisch sind unterbelichtete Stellen, hier sind einzelne Massepunkte vom Zentrum der Laserlinie versetzt. Durch Verwendung des Linienmodells wird die Laserlinie trotz fehlender Intensitätsinformation zuverlässig segmentiert. Die folgende Abbildung 5.1 zeigt die abgeschlossene erfolgreiche Segmentierung mit dem Feder-Masse-Modell.

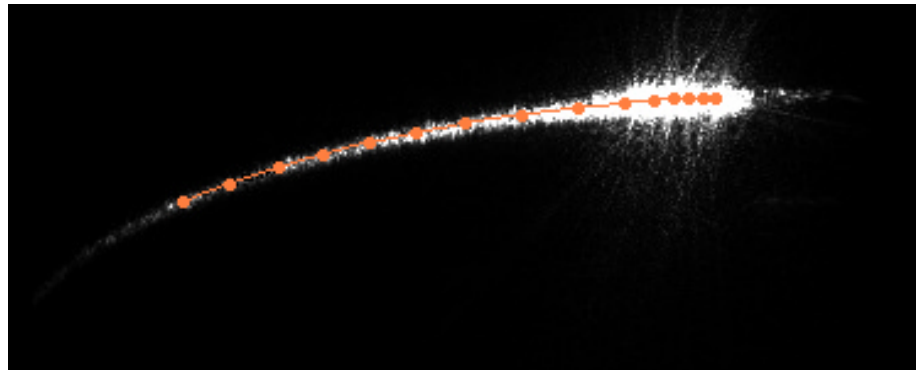
Abbildung 5.1: Die Laserlinie der Kugel nach der Segmentierung mit dem Feder-Masse-Modell. Die roten Linien zwischen den blauen Massepunkten zeigen gestauchte Federn an.



In der Abbildung 5.1 sind geringe Krümmungen innerhalb des Linienmodells zu sehen. Der Intensitätssensor des letzten Massepunktes (ganz rechts) erzeugt eine Kraft zu den größeren Intensitäten (links von ihm). Dies staucht die Federn, welche wiederum Massepunkte vom Zentrum der Laserlinie wegdrücken. Dem wirkt die Torsionskraft entgegen, sodass das Linienmodell eine relativ glatte Form behält.

Die nächste Abbildung 5.2 zeigt die erfolgreiche Segmentierung mit dem Snake-Modell.

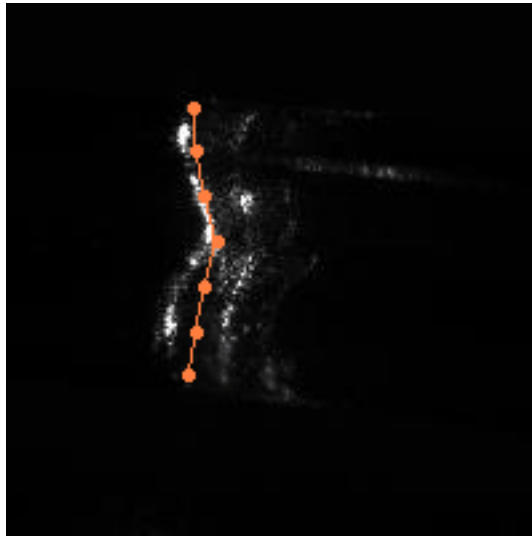
Abbildung 5.2: Die Laserlinie der Kugel nach der Segmentierung mit dem Snake-Modell.



Dieses Linienmodell zeigt nach der Segmentierung eine bessere Glattheit. Weiterhin ist erkennbar, dass die Länge des Linienmodells etwas geringer als beim Feder-Masse-Modell ist. Der Effekt entsteht durch die nicht berücksichtigte Modelllänge im Snake-Modell und der Anwendung der Gauß-Glättung bei der Berechnung des Intensitätsgradienten. Durch die Glättung liegt die Intensitätsspitze näher am Zentrum der Laserlinie, daher ergibt sich hier eine Verkleinerung am Anfang und Ende des Linienmodells. Dennoch segmentiert auch das Snake-Modell den größten Teil der Laserlinie.

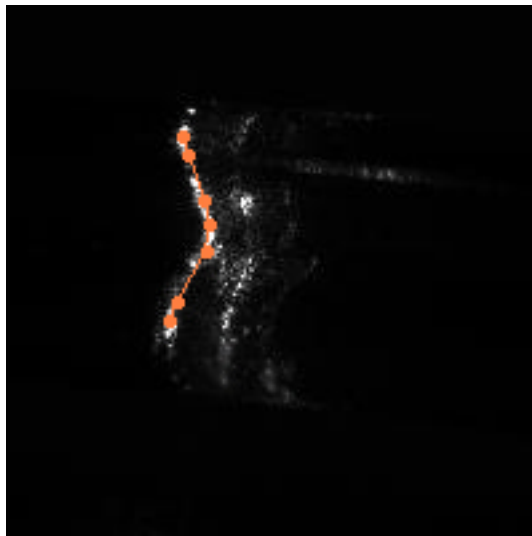
Als nächstes wird die Laserlinie der Brillenfassung (Abbildung 2.4) betrachtet. Ein durch die Modellgenerierung entstehendes Linienmodell zeigt die folgendes Abbildung 5.3.

Abbildung 5.3: Das Linienmodell (Snake-Modell) nach der Modellgenerierung am Beispiel der Brillenfassung.



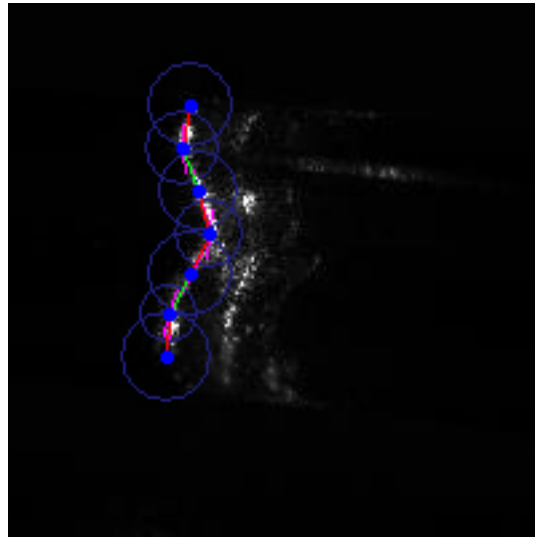
Hier zeigt sich, dass die abgebildeten Sekundärreflektionen die Modellgenerierung stören. Jedoch ermöglicht der Segmentierungsprozess eine erfolgreiche Segmentierung. Das Ergebnis ist in folgender Abbildung 5.4 dargestellt.

Abbildung 5.4: Das Linienmodell (Snake-Modell) nach der Segmentierung der Laserlinie.



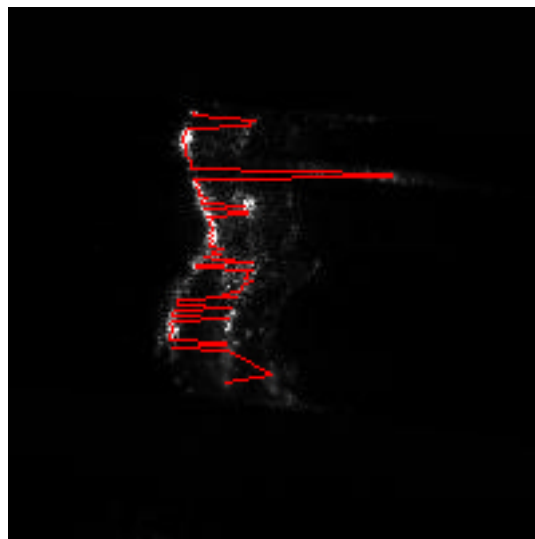
Die erfolgreiche Segmentierung gelang, da der Hauptteil der Intensität der Primärreflektion zugeordnet ist. Wenn dieses Kriterium erfüllt ist, die entsprechenden Pixel geglättet sind und zudem das Linienmodell in der Nähe der zu segmentierenden Laserlinie initialisiert ist, dann kann eine Laserlinie erfolgreich segmentiert werden. Dies gilt äquivalent für die Segmentierung mittels Feder-Masse-Modell. Die folgende Abbildung 5.5 zeigt die erfolgreiche Segmentierung mittels Feder-Masse-Modell.

Abbildung 5.5: Das Linienmodell nach der Segmentierung mittels Feder-Masse-Modell am Beispiel der Brillenfassung.



Im Vergleich zeigt sich, dass beide Verfahren trotz der auftretenden Störungen den größten Teil der Laserlinie segmentieren. Der Ansatz der modellbasierten Segmentierung erzeugt bei beiden Modellen durch Ausnutzung globaler Informationen eine hohe Qualität der Segmentierung. Ein Verfahren, welches lokale Informationen nutzt und z. B. in jeder Bildzeile nur den größten Intensitätswert sucht und diese Punkte verbindet, bietet am Beispiel der Brillenfassung eine schlechte Segmentierungsqualität. Dies zeigt die folgende Abbildung 5.6.

Abbildung 5.6: In dieser Abbildung sind die Pixel mit der größten Intensität (pro Bildzeile) als rote Punkte dargestellt, welche durch rote Linien verbunden sind. Die so erzeugte Linie repräsentiert in ihrer Form nicht die abgebildete Profillinie.



Zusammengefasst bieten das Feder-Masse-Modell und das Snake-Modell eine vergleichbare Segmentierungsqualität. Beide Modelle ermöglichen eine erfolgreiche Segmentierung trotz der Störungen der abgebildeten Laserlinie. Nach der Segmentierung besitzt das Linienmodell basierend auf dem Snake-Modell eine etwas geringere Länge, jedoch wird auch hier der größte Teil der abgebildeten Laserlinie segmentiert.

Im nächsten Abschnitt werden die Laufzeiten des Segmentierungsprozesses betrachtet.

5.2 Vergleich der Laufzeit

Für den Vergleich der Laufzeit wurden beide Verfahren an mehreren Bildern angewendet und die Zeiten für die Segmentierung gemessen. Da der Intensitätssensor des Feder-Masse-Modells modular entwickelt wurde, ist dem Snake-Modell auch die Möglichkeit gegeben, diesen für die Intensitätskraftberechnung zu nutzen. Damit wurden 3 Modellversionen am Testbildsatz angewendet und die Laufzeiten ermittelt. Die im weiteren Teil genannten Werte wurden mit einem Intel Core 2 mit 2,4 GHz gemessen, wobei ein Kern genutzt wurde.

Zunächst wurden die Zeiten für die Modellgenerierung gemessen. Diese variieren je nach Auflösung des Bildes und Größe der abgebildeten Laserlinie. Die meiste Zeit benötigt ein Bild im Testdatensatz mit einer Auflösung von 1392 x 1040 Pixeln. Dabei belegt die abgebildete Laserlinie einen Bereich von ca. 1300 x 300 Pixeln. Hierfür werden bei beiden Modellen ca. 0,03 Sekunden benötigt.

Nach der Modellgenerierung wurden die Laufzeiten des Segmentierungsprozesses gemessen. Diese Zeiten listet die folgende Tabelle 5.2 auf.

Tabelle 5.1: Die Tabelle zeigt die 3 Varianten mit ihrer mittleren und maximalen Laufzeit.

Modell	Mittlere Rechenzeit	Maximale Rechenzeit
Feder-Masse	0,02 sec	0,11 sec
Snake (Klassisch)	0,01 sec	0,03 sec
Snake (Feder-Masse-Sensor)	0,03 sec	0,06 sec

In der Tabelle 5.2 zeigt sich das Snake-Modell mit dem klassischen Ansatz (Intensitätsgradientenberechnung mit Gauß-Glättung) als schnellstes Verfahren. Das hier implementierte Modell bietet die beste durchschnittliche und maximale Laufzeit. Betrachtet man das Snake-Modell mit dem Sensor vom Feder-Masse-Modell im Ablauf, so ist dieses nur schneller wenn die Qualität der abgebildeten Laserlinie sehr gut ist, d. h. keine Unterbrechungen auftreten und das Modell nach der Generierung auf der Laserlinie ist. Die dynamische Verkleinerung der Sensorradien und die daraus resultierende Verringerung der Pixel bietet hier Vorteile gegenüber der fixen Kernelgröße der Gauß-Glättung beim Snake-Modell.

Zusammenfassend ermöglichen das Feder-Masse-Modell und Snake-Modell eine schnelle Segmentierung der Laserlinie. Ein Vergleich der implementierten Modelle zeigt das Snake-Modell als schnellstes Verfahren.

5.3 Ergebnisse der Laufzeitoptimierung

Nach Betrachtung der Gesamtlaufzeit des Segmentierungsprozesses werden im Folgenden die in Abschnitt 3.5 vorgestellten fünf Optimierungen für die Laufzeitverkürzung analysiert. Diese tragen einen Teil zu den erreichten Zeiten bei. Für die nachfolgend beschriebene Auswertung wurden im Programm die Laufzeiten ohne und mit entsprechender Optimierung gemessen.

Die erste Optimierung betrifft die Anwendung des Bresenham-Algorithmus für die Intensitätssensoren des Feder-Masse-Modells. Die Verwendung dieses Algorithmus zeigt im Vergleich zum Blocktest (mit Wurzelfunktion beim

Distanztest) im Testbilddatensatz eine Geschwindigkeitszunahme ca. um den Faktor 10.

Die Implementierung des dynamischen Sensorradius des Intensitätssensors im Feder-Masse-Modell senkt im Testbildsatz die Laufzeit im Schnitt auf die Hälfte. Diese Methode beschleunigt u. a. die Berechnung der Intensitätskräfte, wenn sich ein Massepunkt auf der Laserlinie befindet und beim Ausbalancieren der inneren Modellkräfte an der Laserlinie entlangwandert.

Der Vergleich der 4 vorgestellten Kräftekarten zeigt, dass das Kartenmodell 1 (lokale Karte mit einem Pixel) ungeeignet ist. Die großen Unterschiede zwischen den Intensitätskräften an den diskreten Pixelpositionen führen zu sprunghaften Bewegungen der Masse-/Snake-Punkte. Das Erreichen eines stabilen Zustandes benötigt eine deutlich höhere Laufzeit gegenüber den anderen 3 Varianten der Kräftekarte. Damit ist diese Kräftekarte ungeeignet. Ein Vergleich der Laufzeiten bei den verbleibenden drei Kartenmodellen zeigt Kartenmodell 4 (globale Karte) als schnellste Variante. Das Kartenmodell 2 (lokale Karte mit 2×2 Werten) benötigt eine geringfügig höhere Laufzeit. Das Kartenmodell 3 (lokale Karte mit 3×3 Werten) benötigt eine etwas mehr als doppelte Laufzeit gegenüber Kartenmodell 4. Bei der Analyse zeigt sich, dass die Masse-/Snake-Punkte sehr selten zu vorherigen, diskreten Pixelpositionen zurückkehren. Daher werden bei dem Kartenmodell 3 unnötig viele Pixel für die Kräftekarte betrachtet. Damit wird die globale Kräftekarte (Kartenmodell 4) als Standard festgelegt und verwendet. Die Anwendung dieser Kräftekarte führt im Schnitt zu einer Beschleunigung ca. um den Faktor 8.

Die Optimierung mittels Approximation mathematischer Grundfunktionen sorgt hauptsächlich für eine Beschleunigung der Berechnung der Torsionskräfte im Feder-Masse-Modell. Dies senkt insbesondere die Rechenzeit für das Ausbalancieren der inneren Kräfte. Ein Laufzeitvergleich zeigt im Schnitt eine Senkung der Laufzeit bis zu 50%, ohne sichtbare Unterschiede bei der Segmentierungsqualität.

Die Umsetzung der Methode der dynamischen Schrittweite senkt im Testbildsatz die Laufzeit im Schnitt auf die Hälfte. Hier zeigt sich beim Einsatz ein Potential für die Entwicklung einer besseren Heuristik der skalierten Schrittweite für eine weitere Beschleunigung des Segmentierungsprozesses.

Nach Vergleich von Segmentierungsqualität und der Laufzeiten mit den Optimierungen, erfolgt nun eine Betrachtung der Handhabung beider Modelle.

5.4 Allgemeines Handling

Die Segmentierung der Laserlinie mittels Feder-Masse-Modell und Snake-Modell benötigt etwas Handarbeit. So müssen die Werte für die Parameter des Linienmodells bestimmt werden, um eine vollautomatische Segmentierung zu ermöglichen.

Hier zeigt sich, dass am Anfang sehr viel Arbeit für eine erste Schätzung geeigneter Parameterwerte nötig ist. Aufgrund des leicht verständlicheren, physikalischen Ansatzes des Feder-Masse-Modells gestaltet sich dort eine Abschätzung etwas einfacher. Am schwierigsten gestaltet sich die Festlegung der erlaubten Krümmung des Linienmodells. Hier muss ein Kompromiss gefunden

werden. Wird z. B. eine große Krümmung erlaubt, so kann möglicherweise eine stark gekrümmte Laserlinie besser segmentiert werden, jedoch besitzt dann das Linienmodell bei Unterbrechungen der Laserlinie eine geringere Richtungskontinuität.

Es eignet sich, zuerst manuell relativ geeignete Werte zu suchen und basierend auf denen den anliegenden Wertebereich zu analysieren. Eine unterstützende Möglichkeit bietet dazu die vorgestellte Batch-Funktion für Segmentierungsreihen. Die ermittelten Werte können mittels Pivot-Tabellen in Excel begutachtet werden. Berechnet man eine Segmentierungsreihe mit unterschiedlichen Werten eines Modellparameters, so listet die erzeugte Pivot-Tabelle die jeweiligen Qualitätswerte auf. Dies erlaubt Rückschlüsse auf einen geeigneten Wert. Die folgende Abbildung 5.7 zeigt dies am Beispiel.

Abbildung 5.7: Die Abbildung veranschaulicht eine Pivot-Tabelle. Hier wurden für die Dämpfungskonstante des Feder-Masse-Systems 3 verschiedene Werte getestet. Die Zeilen der Tabelle zeigen die entsprechend berechneten Qualitätswerte. Ein kleiner Qualitätswert deutet einen geeigneten Wert für den Modellparameter an. An diesem Beispiel lässt sich ableiten, dass 0,8 ein guter Wert für die Dämpfungskonstante ist. Er bietet die geringste mittlere Laufzeit und die Qualität des Modells ist insgesamt am besten.

	damp constant ▾		
Werte	0,8	0,78	0,82
Minimum von compute time	0,9896	0,9937	0,9916
Mittelwert von compute time	0,9930	1,4748	1,4720
Maximum von compute time	0,9963	1,9558	1,9523
Minimum von qualityInt	0,3406	0,3561	0,3555
Mittelwert von qualityInt	0,3504	0,3564	0,3760
Maximum von qualityInt	0,3601	0,3566	0,3964
Minimum von qualityTors	0,2034	0,2034	0,2034
Mittelwert von qualityTors	0,2038	0,2038	0,2038
Maximum von qualityTors	0,2042	0,2042	0,2042
Minimum von qualityTime	0,0990	0,0994	0,0992
Mittelwert von qualityTime	0,0993	0,1475	0,1472
Maximum von qualityTime	0,0996	0,1956	0,1952
Minimum von qualityAll	0,6438	0,6602	0,6588
Mittelwert von qualityAll	0,6535	0,7077	0,7269
Maximum von qualityAll	0,6631	0,7551	0,7950

Nach Abschätzung eines geeigneten Wertes eines Parameters kann dieser zusätzlich anhand der generierten Screenshots der entsprechenden Segmentierungsreihe überprüft werden.

Es sei hier angemerkt, dass es keine für alle Aufgaben ideale Parameterwahl gibt. Theoretisch benötigt jedes aufgenommene Bild für eine optimale Segmentierung eine eigene Parametrisierung des Linienmodells. Im verwendeten Testdatensatz befinden sich Bilder mit unterschiedlichen Auflösungen und Laserlinien von Profilen unterschiedlicher Körper. Die ermittelten Parameter für eine automatische Segmentierung zeigen bei Anwendung an einigen Stellen der Laserlinie keine optimale Segmentierung. Bei einigen Bildern zeigt z. B. das Linienmodell bei starken Krümmungen der Laserlinie eine etwas zu große Steifigkeit und ist an diesen Stellen etwas versetzt zur Laserlinie. Für eine optimalere Segmentierung besteht die Möglichkeit, je nach gewünschtem Anwendungsgebiet (Vermessung von Brillenfassungen, Radprofilen, ...) separate

Bilddatensätze zu erstellen, basierend darauf eine Parametrisierung zu ermitteln und diese Werte auch nur für den speziellen Aufgabenbereich zu verwenden.

Im folgenden Abschnitt erfolgt eine weitere Analyse von Problematiken beider Modelle. Es werden die Grenzen beider Verfahren betrachtet.

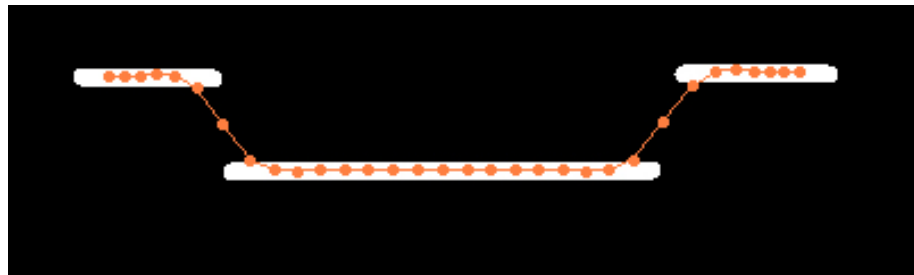
5.5 Grenzen der Verfahren

Die Anwendung des Snake- und Feder-Masse-Modells für die Segmentierung von Laserlinien besitzt Grenzen. Im Folgenden werden Grenzen der implementierten Modelle vorgestellt.

Eine Einschränkung der implementierten Modelle ist die Bedingung, dass die zu segmentierende Laserlinie immer das hellste Objekt im Bild sein muss. In der Praxis ist eine gewünschte zu segmentierende Primärreflektion nicht immer das hellste Objekt im Bild. Bei stark transparenten Materialien können Sekundärreflektionen heller abgebildet werden. Hier werden wenige Laserstrahlen an der Objektoberfläche reflektiert, die meisten Laserstrahlen dringen in das Material ein, bevor sie zurückgeworfen werden. Eine Abgrenzung von Primärreflektion und Sekundärreflektionen im Bild benötigt in diesem Fall zusätzliche a-priori-Informationen.

Beide Modelle geben dem Linienmodell eine gewisse Steifigkeit, mit der sie sich verbiegen können. Diese Eigenschaft ermöglicht die Segmentierung einer unterbrochenen Laserlinie. Der Nachteil dieser Eigenschaft ist, dass Diskontinuitäten in der abgebildeten Laserlinie nicht optimal segmentiert werden. An diesen Stellen zeigt das Linienmodell eine Krümmung. Dies veranschaulicht die folgende Abbildung 5.8.

Abbildung 5.8: Die Abbildung zeigt den abgeschlossenen Segmentierungsprozess (Snake-Modell) an einem synthetisch erzeugten Bild einer Laserlinie mit Diskontinuitäten.



Nach Aufzeigen der Grenzen der implementierten Verfahren erfolgt im nächsten Abschnitt die Wahl eines der implementierten Modelle für den Einsatz in der Praxis.

5.6 Modellwahl für praktischen Einsatz

Die Aufgabenstellung sieht vor, das am besten geeignete Modell für den weiteren Einsatz in der Praxis zu wählen.

Betrachtet man die Segmentierungsqualität, so ist diese bei beiden Modellen vergleichbar. Das Linienmodell mittels Snake-Modell zeigt gegenüber dem Feder-Masse-Modell eine geringere Größe nach der Segmentierung. Dies ist jedoch bei allen Bildern im Testdatensatz unproblematisch, da der meiste Teil der Laserlinie segmentiert wird. Es ergibt sich hier kein eindeutig geeigneteres Modell. Die Analyse der Laufzeiten der implementierten Modelle zeigt das Snake-Modell als schnellstes Verfahren. Im Schnitt benötigt das Feder-Masse-Modell die dreifache Zeit für die Segmentierung. Eine Betrachtung der Handhabung und Grenzen beider Modelle zeigt kein entscheidendes Kriterium für die Wahl.

Aufgrund der geringeren Laufzeit ist das Snake-Modell für den Einsatz in der Praxis besser geeignet.

5.7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die erreichten Ergebnisse evaluiert. Zuerst wurde die Segmentierungsqualität und anschließend die Laufzeit verglichen. Desweiteren erfolgte eine Betrachtung der Optimierungen für eine verkürzte Programm-laufzeit. Weiterhin erfolgte eine Betrachtung der Handhabung beider Modelle, sowie ein Blick auf Grenzen beider Verfahren. Abschließend wurde anhand der erreichten Ergebnisse das Snake-Modell für die automatische Segmentierung in der Praxis ausgewählt.

6

Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurden zwei Verfahren für eine robuste und schnelle Segmentierung von Laserlichtlinien entwickelt. Das erste Verfahren basiert auf dem Feder-Masse-Modell, das zweite Verfahren auf dem Modell der Snakes. Die Ansätze beider Modelle wurden in dieser Arbeit grundlegend erläutert und ihre Modifikation für die Segmentierung einer Laserlinie beschrieben. Die entwickelten Verfahren nutzen für eine erfolgreiche Segmentierung der Laserlinie ein Linienmodell für die Behandlung auftretender Störungen in der Abbildung der Laserlinie. Zusätzlich wurde ein Konzept entwickelt, um ein Linienmodell aus Bilddaten zu generieren und seine Parameter zu bestimmen. Dies ermöglicht es, den Segmentierungsprozess voll zu automatisieren. Des Weiteren wurden Optimierungen vorgestellt um den Segmentierungsprozess zu beschleunigen.

Im Rahmen der Arbeit wurde ein Programm entwickelt, das beide Verfahren umsetzt. Es bietet eine Visualisierung des Segmentierungsprozesses und unterstützt die Parametrisierung eines Linienmodells für eine vollautomatische Segmentierung.

Die entwickelten Verfahren wurden auf realen Bildaufnahmen angewendet und miteinander verglichen. Es zeigte sich eine vergleichbare Segmentierungsqualität. Beide Verfahren segmentieren Laserlinien erfolgreich trotz auftretender Störungen. Im weiteren Teil wurden die Handhabung und Grenzen beider Verfahren betrachtet. Hier zeigen sich ebenfalls vergleichbare Ergebnisse. Der Laufzeitvergleich zeigt das implementierte Snake-Modell als 3x schneller gegenüber dem implementierten Feder-Masse-Modell.

Nach Analyse der erreichten Ergebnisse wurde das Snake-Modell für den weiteren Einsatz in der Praxis gewählt.

6.2 Ausblick

Die in dieser Arbeit entwickelte Segmentierung von Laserlichtlinien bildet die Grundlage für eine automatische Belichtungssteuerung. Im Zuge dieses Einsatzes gilt es, das Segmentierungsverfahren an einen Bilddatensatz mit stark unter- und überbelichteten Bildern zu testen und ggfs. einzelne Schritte des implementierten Segmentierungsprozesses zu überarbeiten. Dies betrifft z. B. die Anwendung des Schwellwertverfahrens bei der automatischen Modellgenerierung. Bei einer falschen Wahl des (zur Zeit nur manuell einstellbaren) Schwellwertes erzeugt ein unterbelichtetes Bild möglicherweise ein schlechtes Linienmodell.

Weiterhin besteht Potential für weitere Verkürzungen der Laufzeit. Die implementierten Verfahren nutzen nur einen einzelnen Prozessor-Kern. Es besteht die Möglichkeit, Teile des Segmentierungsprozesses zu parallelisieren. So ist z. B. die Berechnung der Intensitätskräfte sehr zeitintensiv und kann auf mehrere Prozessor-Kerne aufgeteilt werden.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Aufnahme des prototypischen Messsystems.	3
2.2	Schematische Anordnung von Lasergenerator und einer Kamera.	4
2.3	Laserlinie einer Kugel.	5
2.4	Laserlinie einer Brillenfassung.	6
2.5	Beispiel für ein Feder-Masse-Modell.	8
2.6	Beispiel eines instabilen Feder-Masse-Modells.	10
3.1	Linienmodell, basierend auf Feder-Masse-Modell.	15
3.2	Linienmodell, basierend auf Snake-Modell.	16
3.3	Zuerst gefundene Bounding Box bei Generierung des Modells.	17
3.4	Automatisch generiertes Feder-Masse-Modell.	18
4.1	Screenshot des entwickelten Programmes.	25
4.2	Erweiterte Funktionen des entwickelten Programmes.	26
4.3	Batch-Funktion des entwickelten Programmes.	27
5.1	Laserlinie der Kugel nach Segmentierung mit Feder-Masse-Modell.	29
5.2	Laserlinie der Kugel nach Segmentierung mit Snake-Modell.	30
5.3	Linienmodell nach der Modellgenerierung am Beispiel der Brillenfassung.	31
5.4	Linienmodell nach der Segmentierung mittels Snake-Modell am Beispiel der Brillenfassung.	31
5.5	Linienmodell nach der Segmentierung mittels Feder-Masse-Modell am Beispiel der Brillenfassung.	32
5.6	Segmentierung mittels lokaler Information.	32
5.7	Veranschaulichung einer Pivot-Tabelle.	35
5.8	Segmentierungsproblem bei Diskontinuitäten.	36

Literaturverzeichnis

- [ATW88] Amir A. Amini, Saeid Tehrani, and Terry E. Weymouth. Using Dynamic Programming for Minimizing the Energy of Active Contours in the Presence of Hard Constraints. *In: Second International Conference on Computer Vision*, pages 95–99, 1988.
- [AZT03] Stephan Al-Zubi and Klaus Toennies. Generalizing the Active Shape Model by Integrating Structural Knowledge to Recognize Hand Drawn Sketches. *In: Proceedings of CAIP 2003*, pages 320–328, 2003.
- [Bak07] Marian Bakos. Active Contours and their Utilization at Image Segmentation. *In: Proceedings of 5th Slovakian-Hungarian Joint Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics*, pages 313–317, 2007.
- [Ben04] Peter Benedix. *Automatisierungsprozesse zur Parameterisierung und Generierung dynamischer Modelle*. Otto-von-Guericke University of Magdeburg, Diplomarbeit, 2004.
- [BRE] Kreisvariante des Bresenham-Algorithmus. http://de.wikipedia.org/wiki/Bresenham-Algorithmus#Kreisvariante_des_Algorithmus.
- [Dor05] Lars Dornheim. *Generierung und Dynamik physikalisch basierter 3D-Modelle zur Segmentierung des linken Ventrikels in SPECT-Daten*. Otto-von-Guericke University of Magdeburg, Diplomarbeit, 2005.
- [DT07] L. Dornheim and K. D. Tönnies. Quality of Fit of Stable Mass Spring Models. http://www.isg.cs.uni-magdeburg.de/~lars/publications/Dornheim_OGRW_2007.pdf, 2007.
- [FIS] Fast inverse square root. http://en.wikipedia.org/wiki/Fast_inverse_square_root.
- [HL96] Michael Hoch and Peter C. Litwinowicz. A practical solution for tracking edges in image sequences with snakes. *In: The Visual Computer, Vol. 12, No 2*, pages 75–83, 1996.

- [Jäh05] Bernd Jähne. *Digitale Bildverarbeitung*. 6. Auflage, Springer Verlag, 2005.
- [KKS96] Reinhard Klette, Andreas Koschan, and Karsten Schlüns. *Computer Vision. Räumliche Information aus digitalen Bildern*. Vieweg Verlag, 1996.
- [KWT88] Michael Kass, Andrew Witkin, and Demetri Terzopoulos. Snakes: Active contour models. *In: International Journal of Computer Vision*, pages 321–331, 1988.
- [SDP06] Heiko Seim, Jana Dornheim, and Uta Preim. Ein 2-Fronten-Feder-Masse-Modell zur Segmentierung von Lymphknoten in CT-Daten des Halses. *In: Bildverarbeitung für die Medizin 2006*, pages 106–110, 2006.
- [WS92] Donna J. Williams and Mubarak Shah. A Fast Algorithm for Active Contours and Curvature Estimation. *In: CVGIP: Image Understanding, Vol. 55, No. 1*, pages 14–26, 1992.
- [wxW] wxwidgets, cross-platform gui library. <http://wxwidgets.org/>.