

Frederick Struckmeier

# Prozesssicherheit von Laserschneidmaschinen – Auflagemessung und Schachtelung



Frederick Struckmeier

**Prozesssicherheit von Laserschneidmaschinen –  
Auflagemessung und Schachtelung**

**Forschungsberichte aus der Industriellen Informationstechnik**  
**Band 23**

Institut für Industrielle Informationstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie  
Hrsg. Prof. Dr.-Ing. Michael Heizmann

Eine Übersicht aller bisher in dieser Schriftenreihe erschienenen Bände  
finden Sie am Ende des Buchs.

# **Prozesssicherheit von Laserschneidmaschinen – Auflagemessung und Schachtelung**

von  
Frederick Struckmeier

Karlsruher Institut für Technologie  
Institut für Industrielle Informationstechnik

Prozesssicherheit von Laserschneidmaschinen –  
Auflagemessung und Schachtelung

Zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs  
von der KIT-Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik des  
Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) genehmigte Dissertation

von Frederick Struckmeier, M.Sc.

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Mai 2021

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Michael Heizmann, KIT

Korreferent: apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Längle, Fraunhofer IOSB

#### Impressum



Scientific  
Publishing

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
KIT Scientific Publishing  
Straße am Forum 2  
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark  
of Karlsruhe Institute of Technology.

Reprint using the book cover is not allowed.

[www.ksp.kit.edu](http://www.ksp.kit.edu)



*This document – excluding parts marked otherwise, the cover, pictures and graphs –  
is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License  
(CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons  
Attribution-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2022 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISSN 2190-6629

ISBN 978-3-7315-1127-4

DOI 10.5445/KSP/1000137688





# Vorwort

Die vorliegende Arbeit wäre ohne die Hilfe und Unterstützung von vielen Menschen nicht möglich gewesen. Bei allen, die mir geholfen haben, möchte ich mich bedanken.

Als erstes möchte ich Prof. Dr.-Ing. Fernando Puente León erwähnen, der meine Arbeit am IIT ermöglicht und zu großen Teilen betreut hat. Ein ebenso großer Dank gilt Prof. Dr.-Ing. Michael Heizmann für seine Betreuung und die Übernahme des Hauptreferats und Prof. Dr.-Ing. Thomas Längle für die Übernahme des Korreferats.

Ein besonderer Dank gilt Dr.-Ing. Jens Otnad, der mir als Leiter der Vorentwicklung bei TRUMPF Werkzeugmaschinen diese Aufgabe gegeben und meine Arbeit begleitet hat. Ebenso möchte ich mich bei Dr.-Ing. Thomas Schneider bedanken, der als Entwicklungsleiter von TRUMPF Werkzeugmaschinen diese Arbeit mit ermöglicht und mit großer Begeisterung verfolgt hat. Dieser Dank gilt gleichzeitig auch allen Kolleginnen und Kollegen bei TRUMPF, sowohl in der Vorentwicklung, als auch darüber hinaus, die mich tatkräftig unterstützt und ermutigt haben.

Auch den Promovierenden am IIT gilt mein Dank. Durch sie und die Diskussionen über unsere Arbeiten hat sich mein Blick für technische Probleme und Lösungsansätze geschärft. Außerdem haben mehrere die Arbeit aufmerksam Korrektur gelesen.

Ein großer Dank geht zudem an die Studierenden, die mich bei der Arbeit als Praktikanten oder Abschlussarbeiter direkt unterstützt und zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben.

Nicht zuletzt gilt meiner Familie, insbesondere meinen Eltern, ein großer Dank. Ohne euren Rückhalt und eure Unterstützung wäre Vieles, nicht nur in Bezug auf diese Arbeit, nicht möglich gewesen.

Heimsheim, im Juni 2021

Frederick Struckmeier



# Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> . . . . .	<b>i</b>
<b>Symbolverzeichnis</b> . . . . .	<b>vii</b>
<b>1 Einleitung</b> . . . . .	<b>1</b>
1.1 Problemstellung . . . . .	3
1.2 Eigener Beitrag . . . . .	7
1.3 Gliederung der Arbeit . . . . .	8
<b>2 Vermessung der Auflagestege von Laserflachbettmaschinen</b> .	<b>11</b>
2.1 Grundlagen der digitalen Bildverarbeitung . . . . .	11
2.1.1 Grundlagen digitaler Bilder . . . . .	11
2.1.2 Transformationen und Projektionen von digitalen Bildern . . . . .	15
2.2 Umgebungsbedingungen und Vorüberlegungen . . . . .	17
2.2.1 Umgebungsbedingungen von Laserflachbettmaschinen . . . . .	17
2.2.2 Visuelle Detektionsverfahren . . . . .	19
2.3 Stegdetektion mittels Laser-Triangulation . . . . .	21
2.3.1 Stand der Technik . . . . .	21
2.3.2 Aufbau und Kalibrierung . . . . .	24
2.3.3 Bildverarbeitung und Transformationen . . . . .	29
2.3.4 Methode zur Unterdrückung von Reflexionen . . . . .	31
2.3.5 Umsetzung . . . . .	33
2.3.6 Messgenauigkeit des Laser-Triangulationssystems . . . . .	34
2.3.7 Robustheit des Laser-Triangulationssystems . . . . .	37
2.4 Stegdetektion auf einzelnen Bildern im sichtbaren Spektrum	40
2.4.1 Detaillierte Problembeschreibung . . . . .	40
2.4.2 Stand der Technik . . . . .	42

2.4.3	Methoden zur Stegdetektion auf einzelnen Grauwert-Aufnahmen . . . . .	44
2.4.4	Umsetzung, Ergebnisse und Diskussion . . . . .	49
2.5	Stegdetection durch schmalbandige Nahinfrarot-Aufnahmen	52
2.5.1	Stand der Technik . . . . .	52
2.5.2	Konstruktion einer schmalbandigen NIR-Dunkelfeldbeleuchtung . . . . .	53
2.5.3	Auswertungsmethoden für schmalbandige NIR-Aufnahmen . . . . .	54
2.5.4	Umsetzung . . . . .	57
2.5.5	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	59
<b>3</b>	<b>Schachtelung für Laserschneidmaschinen . . . . .</b>	<b>61</b>
3.1	Stand der Technik . . . . .	61
3.1.1	Schachtelung . . . . .	61
3.1.2	Exakte Lösung von Schachtelungsproblemen . . . . .	66
3.1.3	Heuristische Lösung von Schachtelungsproblemen	67
3.1.4	Schachtelung mit Nebenbedingungen aus dem Produktionsprozess . . . . .	70
3.2	Schachtelung unter Berücksichtigung der Auflagepunkte .	72
3.2.1	Formale Problembeschreibung und exakte Lösung	72
3.2.2	Lösung durch eine Konstruktionsheuristik . . . . .	75
3.2.3	Lokales Verschiebverfahren und Berechnungen . . .	76
3.2.4	Ergebnisse und Diskussion der Konstruktionsheuristik . . . . .	81
3.2.5	Lösung durch eine Verbesserungsheuristik . . . . .	86
3.2.6	Berechnungen und Diskussion der Verbesserungsheuristik . . . . .	88
<b>4</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick . . . . .</b>	<b>95</b>
4.1	Zusammenfassung . . . . .	95
4.2	Ausblick . . . . .	97
<b>A</b>	<b>Verkipfberechnung bei geschnittenen Teilen . . . . .</b>	<b>101</b>
<b>B</b>	<b>Teile und Schachtelungen . . . . .</b>	<b>105</b>

<b>Literaturverzeichnis</b> . . . . .	<b>113</b>
Eigene Veröffentlichungen . . . . .	119
Betreute studentische Arbeiten . . . . .	119



# Symbolverzeichnis

## Allgemeine Abkürzungen

### Abkürzung Bedeutung

---

bzw.	beziehungsweise
engl.	englisch
etc.	et cetera
evtl.	eventuell
ggf.	gegebenenfalls
u. d. N.	unter den Nebenbedingungen
vgl.	vergleiche
z. B.	zum Beispiel
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
DoG	Difference-of-Gaussian
FN	falsch negativ
FP	falsch positiv
i. d. R.	in der Regel
IFP	Inner-Fit-Polygon
LFM	Laserflachbettmaschine
LTS	Laser-Triangulationssystem
MIP	Mixed Integer Problem
NC	Numerical Control
NFP	No-Fit-Polygon
NIR	Nahinfrarot
RN	richtig negativ
RNR	richtig negativ Rate
RP	richtig positiv
RPR	richtig positiv Rate

## Symbole

### Lateinische Buchstaben

Symbol	Bedeutung
$(x, y, z)$	Maschinenkoordinaten einer LFM
<b>A</b>	Matrix der indirekten Kalibrierungskoeffizienten
<b>B</b>	Matrix der direkten Kalibrierungskoeffizienten
$b_{x,y}$	Länge des einhüllenden Rechtecks
$d_s$	Distanz zwischen zwei Auflagespitzen
$d_{st}$	Distanz zwischen zwei Auflagestegen
$g(u, v)$	Grauwertfunktion eines Bildes
$p_{max}$	Position der Laserlinie bei der Laser-Triangulation
$q_t$	Anzahl eines Teiletyps in einer Schachtelung
$t_i$	Teiletyp mit Rotationslage
$(u, v)$	Koordinaten eines Pixels in einem Bild
$w_b$	Gewichtung für die Beschädigung von Stegen
$w_k$	Gewichtung für die Stabilität von geschnittenen Teilen
$w_{pd}$	Gewichtung für die Schachtelungsdichte
$z_b$	Zielvariable für die Beschädigung von Stegen
$z_k$	Zielvariable für die Stabilität von geschnittenen Teilen
$z_{pd}$	Zielvariable für die Schachtelungsdichte

### Griechische Buchstaben

Symbol	Bedeutung
$\delta_{x,y}$	Verschiebung in $x$ - bzw. $y$ -Richtung eines Teils
$\delta_{max}$	Maximale Verschiebung in $x$ - bzw. $y$ -Richtung eines Teils
$\epsilon$	Restterm bei der schrittweisen Annäherung an ein Minimum
$\iota$	Referenzpunkt eines Teils auf dem Blech
$\Phi(\Psi)$	Verkipfverhalten eines Teils
<b><math>\Psi</math></b>	Matrix der Stegauflagen
$\rho$	Menge der Pixel im IFP eines Teils
$\sigma_b$	Maximale Verbesserung der Stegbeschädigung
$\sigma_k$	Maximale Verbesserung der Stabilität

**Symbol**      **Bedeutung**

---

$\Theta$	Matrix der Schneidkonturen
$z_\delta$	Zusätzlicher Verschnitt durch lokale Verschiebung

## Mathematische Operatoren

**Operator**      **Bedeutung**

---

$\operatorname{argmax}\{\cdot\}$	Argument des Maximums
$\ \cdot\ $	Euklidische Norm
$*$	Faltung
$\mathcal{F}(\cdot)$	Fourier-Transformation
$\nabla$	Gradient
$\operatorname{nint}(\cdot)$	Kaufmännische Rundung auf die nächste Ganzzahl



# 1 Einleitung

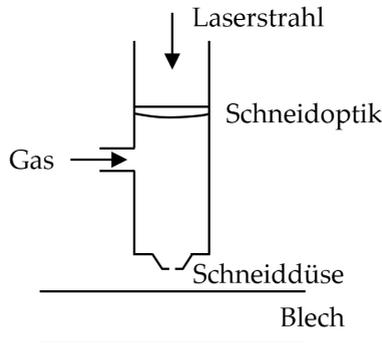
Blech ist ein weit verbreitetes Material in der Produktion von Gütern. Die Karosserien von Autos, die Oberflächen in gewerblichen Küchen, Computergehäuse und Schiffsrümpfe sind beispielsweise alle aus Blech geformt. Bleche können aus unterschiedlichsten Materialien hergestellt werden. Am verbreitetsten sind Bau- und Edelmstähle, aber auch Aluminium, Kupfer, Messing oder sogar Titan sind als Blech verfügbar [10].

Für die Bearbeitung von Blechen zu einem Endprodukt ist fast immer ein trennendes Fertigungsverfahren notwendig. Die ersten trennenden Verfahren waren spanabtragende Verfahren wie z. B. Sägen und Nibbeln. Die Bearbeitung mit mechanischen Verfahren ist aber relativ langsam und benötigt oft Nacharbeit, z. B. das Verrunden von scharfen Kanten am Bauteil. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden Verfahren wie das Wasserstrahl-, Plasma- und Laserschneiden entwickelt [39, 69].

Seit der Markteinführung von Laserschneidmaschinen für die trennende Bearbeitung in der flexiblen Blechfertigung in der Mitte der 1980er Jahre haben sie einen Großteil des Marktes erobert. Dies liegt an ihrer hohen Geschwindigkeit, oftmals geringen Nacharbeit und sehr geringen Rüstzeiten. Das Werkzeug muss nicht gewechselt werden und erleidet im Vergleich zu spanenden Verfahren sehr wenig Verschleiß.

Beim Laserschneiden wird das Blech durch einen Laserstrahl von oben sehr schnell stark erhitzt. Das Material schmilzt und wird durch ein Prozessgas, i. d. R. Sauerstoff oder Stickstoff, nach unten aus dem Schnittpalt ausgetrieben [44, 75]. Der schematische Aufbau eines Schneidkopfs und seine Lage zum Blech sind in Abbildung 1.1 dargestellt.

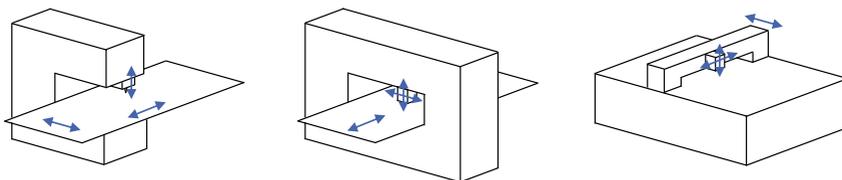
Das Prinzip des Laserschneidens ist in unterschiedlichen Maschinenkonzepten in den Markt eingeführt worden. Diese unterscheiden sich darin, welche Bewegungen durch den Schneidkopf oder das Blech ausgeführt werden. Bei C-Rahmen-Maschinen (siehe Abbildung 1.2 links) wird das Blech in zwei Achsen bewegt und der Schneidkopf verfährt ausschließ-



**Abbildung 1.1** Schematischer Aufbau des Schneidkopfs beim Laserschneiden.

lich in der Höhe. Bei O-Rahmen-Maschinen (siehe Abbildung 1.2 mitte) übernimmt der Schneidkopf zusätzlich eine Achse der Bewegung in der Blechebene, sodass das Blech nur in einer Achse bewegt wird. Neben diesen beiden Maschinenkonzepten haben sich vor allem Flachbettmaschinen (siehe Abbildung 1.2 rechts) durchgesetzt, bei denen das Blech zur Bearbeitung still liegt und sich der Schneidkopf in drei Dimensionen bewegt [41].

Damit die Schlacke nach unten aus dem Schnittpalt ausgeblasen werden kann, sollte der Bereich unter dem Blech frei sein. Dies widerspricht aber einer stabilen Lagerung des Blechs und der zu schneidenden Teile. Gelöst wird dies durch feste Auflagestege (siehe Kapitel 1.1). Nebenzeiten können bei der Laserflachbettmaschine (LFM) dadurch verringert werden, dass die Maschine zwei Paletten hat, von denen eine bearbeitet werden



**Abbildung 1.2** Schematische Darstellung der verschiedenen Maschinenkonzepte zum 2D-Laserschneiden. Links: C-Rahmen-Maschine. Mitte: O-Rahmen-Maschine. Rechts: Flachbettmaschine.

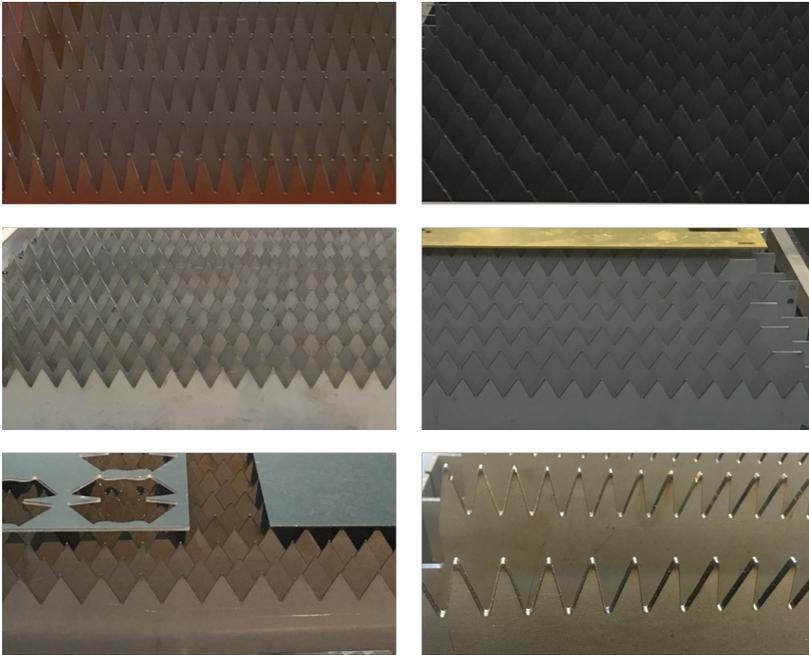
kann, während die andere Palette außerhalb der Maschine für den nächsten Schneidvorgang gerüstet wird. Bei C-Rahmen- und O-Rahmen-Maschinen muss auch freier Raum unter der Schneidkopfpositionen vorhanden sein, um die Schlacke abführen zu können. Dies wird durch eine zylinderförmige Öffnung sichergestellt. Um die Bewegung des Blechs zu ermöglichen, werden oftmals Bürstenteppiche aus Plastik genutzt. Bei beiden Maschinenkonzepten wird i. d. R. versucht, ein geschnittenes Teil sofort aus dem Restgitter zu entfernen, um Probleme bei der Bewegung des Blechs zu umgehen, da gekippte Teile sich am Bürstentisch verkeilen könnten. Diese Unterbrechungen verlängern konzeptbedingt den Schneidvorgang im Vergleich zu einer LFM.

Um auf einer heute marktgängigen LFM ein Teil ausschneiden zu können, sind drei Schritte nötig [10]. Erstens muss die Geometrie des Teils in digitaler Form vorliegen. Es folgt die Programmierung einer Tafel für die Bearbeitung auf der LFM. Dafür müssen alle zu schneidenden Teile auf dem Blech angeordnet werden. Dieser Prozess wird im Folgenden *Schachtelung* genannt. Nach der Schachtelung werden die Bearbeitungsreihenfolge der Teile und die Verfahrswege des Schneidkopfs festgelegt. Damit ist die Logik des Programms festgelegt und kann in die Sprache der Maschinensteuerung übersetzt werden. Ein solches *NC-Programm* (engl. für *numerical control*) wird auf der Maschine ausgeführt.

## 1.1 Problemstellung

Um das Blech während des Schneidens auf einer LFM zu lagern, werden von allen Herstellern wenige Millimeter dicke Auflagestege benutzt, die fast immer aus vielen dreieckigen Spitzen bestehen (siehe Abbildung 1.3). Diese Stege werden parallel zueinander in der Palette befestigt und sind oftmals aus Baustahl, können aber auch aus Edelstahl oder Kupfer gefertigt sein.

Während des Schneidprozesses kann es zu Einbußen bei der Prozesssicherheit kommen, die nicht direkt mit dem Schneidprozess zu tun haben. Dies äußert sich vor allem durch folgende Punkte (siehe auch Abbildung 1.4):



**Abbildung 1.3** Beispiele von Auflagegestegen an Laserflachbettmaschinen verschiedener Hersteller. Oben links: Amada. Oben rechts: Bystronic. Mitte links: LVD. Mitte rechts: Mazak. Unten links: Salvagnini. Unten rechts: TRUMPF.

- Verkippen von Teilen durch die auf das Teil einwirkende Kraft des Prozessgases und unzureichende Lagerung durch Auflagespitzen.
- Verschleiß der Stege vor allem durch vollständiges oder teilweises Abschmelzen von Spitzen, aber auch durch Anhaftung von Schlacke.
- Verschweißen von Teilen mit einer Auflagespitze, wenn direkt über dieser Spitze geschnitten wird und die Schlacke nicht ausreichend durch das Gas entfernt wird.
- Qualitätsprobleme, z. B. Schmauchspuren oder Schlackespritzer an der Unterseite eines Teils beim Schneiden über Auflagegestegen.



**Abbildung 1.4** Beispiele von unerwünschten Effekten der Stege. Links: Verkippte Teile. Mitte: Verschweißter Schneidbutzen auf einer Stegspitze. Rechts: Schlackespritzer am Teil nach Schnitt über einer Stegspitze.

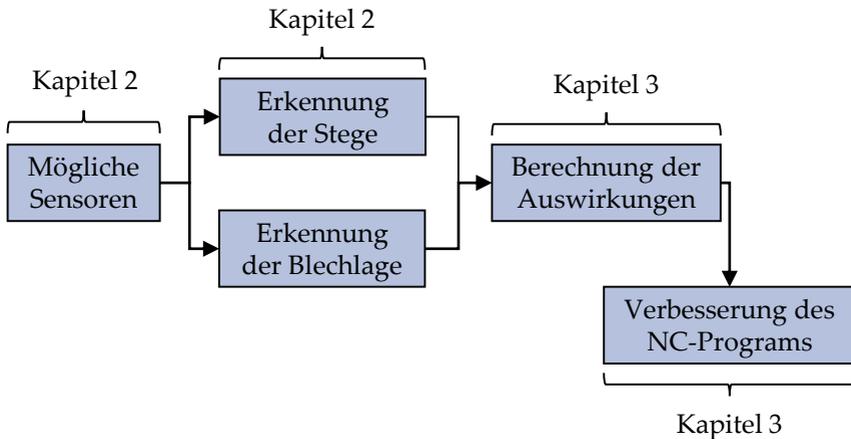
- Abriss des Schnittspalts beim Schneiden über einer Auflagespitze, wenn die Schlacke nicht ausreichend entfernt werden kann und die Laserleistung nicht ausreicht, um das Material trotz der im Schnittspalt verbleibenden Schlacke zu erwärmen.

Die Auswirkungen dieser Punkte sind eine geringe Produktivität der Maschine, da es während der Bearbeitung eines NC-Programms zu ungewollten Stillständen kommen kann. Um eine hohe Maschinenproduktivität zu ermöglichen, ist dann aber ein erheblicher Einsatz von Personal nötig, das diese Probleme erkennt und entweder verhindert oder schnellstmöglich löst. Außerdem kann nur unzureichend auf Automatisierungslösungen zurückgegriffen werden, da Teile, die verkippt oder mit einer Stegspitze verschweißt sind, nicht automatisch entnommen werden können.

Es ist auffällig, dass alle oben genannten Punkte mit den Stegauflagen in Verbindung gebracht werden und grundsätzlich deutlich abgemindert oder sogar vollständig vermieden werden können, wenn die Position der Auflagestege relativ zum Blech bzw. der zu schneidenden Teile bekannt ist. Der Ansatz dieser Arbeit ist, die Position und ggf. auch den Zustand der Auflagestege visuell zu erfassen.

Außerdem kann die Lage des Rohblechs relativ zu den Stegen gemessen werden. Basierend auf den zu schneidenden Teilen, deren Position auf dem Blech, der Blechdicke und -dicke sowie dem Gasdruck kann dann das Verkippen der Teile vor dem Schneiden berechnet werden. Ebenso können die Stegbeschädigung, die Neigung zum Verschweißen oder Orte von möglichen Qualitätsproblemen vorhergesagt werden. Das NC-Programm kann dann entsprechend angepasst werden, um die Probleme je nach Nutzerwunsch bestmöglich zu vermeiden. Dazu zählt z. B. das Verschieben

von Teilen auf dem Blech, das Verschieben der Einstech- und Anfahrpunkte eines Teils oder die Veränderung des Verfahrwegs des Schneidkopfs bei der Positionierung zwischen zwei Teilen. Der Lösungsansatz ist schematisch in Abbildung 1.5 dargestellt.



**Abbildung 1.5** Struktur der vorliegenden Arbeit anhand des Mess- und Berechnungsablaufs zur Generierung von prozesssicheren NC-Programmen bei LFMn.

Natürlich sind auch andere Ansätze zur Milderung der geschilderten Probleme bekannt. Zum Beispiel ist eine andere Strategie, um ein Verkippen von Teilen zu vermeiden, die sogenannten *MicroJoints* [83]. Hierbei wird die Kontur eines Teils nicht vollständig geschnitten und es bleibt eine kleine Brücke (i. d. R. 0,5 mm bis 1 mm) zwischen dem Restgitter und dem Teil stehen. Diese Verbindung reicht aus, um ein Teil im Restgitter stabil zu halten. Um das Verkippen aller Teile eines Blechs garantiert zu verhindern, kann jedes Teil mit einem oder mehreren *MicroJoints* stabilisiert werden. Dies erfordert jedoch bedeutend mehr Nacharbeit, da beim Absortieren der Teile von der Palette zusätzlich jedes Mal mit deutlichem Kraftaufwand der *MicroJoint* gelöst werden und ggf. verbleibendes Material abgeschliffen werden muss.

Da die Probleme spezifisch für die LFM sind, lassen sie sich durch den Einsatz von C-Rahmen- oder O-Rahmen-Maschinen zu großen Teilen vermeiden. Insbesondere das Verkippen tritt bedingt durch die bessere Auf-

lage des geschnittenen Teils auf dem Bürstentisch deutlich seltener auf. Dafür haben diese Maschinen ihre eigenen Prozesssicherheitsprobleme und erreichen bedingt durch das Maschinenprinzip nicht die Bearbeitungsgeschwindigkeit und Produktivität einer LFM.

## 1.2 Eigener Beitrag

Der Beitrag dieser Arbeit liegt vereinfachend zusammengefasst in zwei Gebieten: Zum einen in der visuellen Detektion und Vermessung der Auflagestege und ihres Zustandes und zum anderen in der Auswirkung auf die Schachtelung von Teilen auf einem Blech unter Berücksichtigung der Position der Auflagestege und weiterer Nebenbedingungen, die aus dem Laserschneidprozess resultieren. In Abbildung 1.5 entspricht dies den Schritten, die den Kapiteln 2 und 3 zugeordnet sind. An dieser Stelle sollen die Verbesserungen gegenüber dem Stand der Technik kurz zusammengefasst werden:

- Laser-Triangulation zur Stegdetektion: Es wird ein neuer Aufbau für ein Laser-Triangulationssystem erarbeitet, der sich für LFMn besonders eignet, weil es zu keiner Abschattung und wenig störenden Reflexionen kommt. Für letztere werden Kompensationsverfahren entwickelt. Außerdem wird eine Möglichkeit zur Kalibrierung des Messsystems direkt auf dem zu messenden Objekt konzipiert.
- Stegdetektion auf einzelnen Bildern im sichtbaren Spektrum: Die aus dem Stand der Technik bekannten Methoden zur Objektdetektion werden auf einzelnen Bildern der Palette einer LFM getestet. Dabei wird festgestellt, welche Features am besten zur Detektion geeignet sind und wie sich die Störeinflüsse durch die Produktionsumgebung auf die Detektionsverfahren auswirken.
- Stegdetektion mittels schmalbandiger Nahinfrarot-Beleuchtung: Es wird eine schmalbandige Beleuchtung im Nahinfrarot-Spektrum (NIR) eingesetzt, um die durch die Störeinflüsse der Produktionsumgebung ausgelösten Probleme bei der Detektion der Auflagestege auf einzelnen Bildern zu umgehen. Hierbei werden die Stege in einem flachen Winkel von hinten beleuchtet und die Kamera mit einem

Schmalband-Filter versehen, wodurch sehr dunkle Bilder entstehen, bei denen fast ausschließlich die Auflagestege hell sind. Es werden Verfahren entwickelt, mit deren Hilfe diese Bilder um mögliche Reflexionen bereinigt sowie die Stege und Spitzen effizient erkannt werden können.

- Schachtelung unter Berücksichtigung der Auflagestege: Die Schachtelung von zu schneidenden Teilen wird bisher ausschließlich unter Berücksichtigung des entstehenden Verschnitts durchgeführt. Dies wird um die Verkippwahrscheinlichkeit der Teile und eine mögliche Stegbeschädigung erweitert. Es wird ein formales Modell entwickelt und anschließend werden zwei mögliche Lösungsverfahren vorgestellt. Zum einen handelt es sich dabei um eine Konstruktionsheuristik, die eine Menge von Teilen direkt verschachtelt und dabei alle Kriterien je nach einer gegebenen Gewichtung berücksichtigt. Die Anordnung der Teile erfolgt dabei nach der Bottom-Left-Heuristik und platzierte Teile werden abhängig von der Gewichtung in beiden Richtungen nachträglich verschoben. Das zweite Verfahren ist eine Verbesserungsheuristik, die die Schachtelung einer kommerziellen Software-Bibliothek als Ausgangslösung nutzt und dann nachträglich versucht, jedes Teil in eine bessere Position zu verschieben. Da das Blech in der vollen Breite belegt ist, werden die Teile bei diesem Verfahren nur entlang der Länge des Blechs verschoben.

### 1.3 Gliederung der Arbeit

Die Arbeit teilt sich in zwei große Kapitel: eines zur visuellen Detektion der Auflagestege und eines zur Schachtelung unter Berücksichtigung der Auflagestege.

In Kapitel 2 werden zuerst die Grundlagen der Bildverarbeitung und wichtige Umgebungsbedingungen für die vorliegende Messaufgabe erläutert. Dann werden drei Methoden zur Stegerkennung genauer betrachtet, nämlich Lasertriangulation, die Stegdetektion auf einzelnen Bildern im sichtbaren Spektrum und die Stegdetektion mittels Nahinfrarot-Beleuchtung. Für jede Methode wird zuerst der jeweilige Stand der Technik eingeführt, bevor die neuen Methoden und ihre Umsetzung in der Pra-

xis vorgestellt werden. Es folgt eine Validierung und Diskussion jeder Methode.

In Kapitel 3 wird zuerst der Stand der Technik von Schachtelungsalgorithmen vorgestellt, sowohl für die allgemeine Schachtelung als auch für den Spezialfall von Nebenbedingungen aus dem Produktionsprozess. Danach wird das Problem der Schachtelung unter Berücksichtigung der Auflagepunkte formal beschrieben und zwei Heuristiken vorgestellt, die zur Lösung eingesetzt werden können. Diese werden anschließend durch Berechnungen validiert und genauer charakterisiert.

Abschließend fasst Kapitel 4 die Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf mögliche weitere Forschungsarbeiten.



## 2 Vermessung der Auflagestege von Laserflachbettmaschinen

Eine Vermessung der Auflagestege von LFMn ist auf viele Weisen umsetzbar. Als grundlegende Messprinzipien, die dafür eingesetzt werden können, sind z. B. akustische, visuelle oder kapazitive Messungen denkbar. Für eine visuelle Messung spricht vor allem, dass sich so eine große Fläche einfach in ihrer Gesamtheit oder zeilenweise erfassen lässt, während für die anderen Prinzipien i. d. R. eine punktweise Messung nötig ist. Letzteres dauert oft deutlich länger, was zu unerwünschten zusätzlichen Nebenzeiten an der LFM führen würde.

Im Folgenden werden zuerst die für dieses Kapitel notwendigen Grundlagen der digitalen Bildverarbeitung eingeführt, die Umgebungsbedingungen an einer LFM diskutiert und mögliche visuelle Messprinzipien umrissen. Danach werden drei Messverfahren jeweils in einem Unterkapitel detailliert betrachtet.

### 2.1 Grundlagen der digitalen Bildverarbeitung

#### 2.1.1 Grundlagen digitaler Bilder

##### 2.1.1.1 Aufnahme und Darstellung digitaler Bilder

Die digitale Aufnahme eines Bildes geschieht mittels eines optischen Sensors, der aus einzelnen, rechteckig in einer Matrix angeordneten Zellen besteht. Diese werden als Pixel (kurz für engl. *picture element*) bezeichnet. Eine Szene wird also diskretisiert wahrgenommen. In heutigen Digitalkameras werden dafür vor allem CMOS-Sensoren (kurz für engl. *complementary metal-oxide-semiconductor*) eingesetzt. Diese nutzen den photoelektrischen Effekt und mehrere Halbleitertransistoren, um das gemessene Signal zu

verstärken. Sie bieten im Vergleich zu Sensoren mit dem *Charge Coupled Device* Prinzip mehrere Vorteile, insbesondere hohe Geschwindigkeiten und geringe Kosten [7]. Die spektrale Empfindlichkeit eines CMOS-Sensors beginnt bei etwa 350 nm Wellenlänge und endet bei ungefähr 1100 nm Wellenlänge. Damit decken sich CMOS-Sensoren weitestgehend mit dem wahrnehmbaren Spektralbereich eines Menschen, detektieren aber zusätzlich auch Teile des NIR-Spektrums [46].

Je nach verwendetem Sensor in einer Kamera kann ein Grauwert- oder Farbbild aufgenommen werden. Zur Aufnahme eines Farbbildes wird der CMOS-Sensor mit spektralen Filtern vor jedem Pixel versehen. Der Wahrnehmung des menschlichen Auges folgend werden dabei drei Kanäle genutzt, nämlich rot, grün und blau. Jedes Pixel ist somit nur für einen Farbkanal nutzbar und die Information für die anderen beiden Kanäle muss für dieses Pixel interpoliert werden. Wenn der CMOS-Sensor ohne Modifikation betrieben wird, entstehen Grauwertbilder, die nur die Lichtintensität wiedergeben, aber keine Farbinformationen enthalten. Digitale Bilder werden oftmals in Datenformaten gespeichert, die das Bild als Matrix auffassen. Der Wertebereich für Grauwertbilder wird oftmals von 0 bis 255 gewählt, was einer Darstellung mit 8 bit pro Pixel entspricht.

Durch die Aufnahme mit einem Sensor, der aus diskreten Zellen besteht, lässt sich auch das Bild diskret darstellen. Ein Pixel kann über seine Koordinaten  $(u, v)$  identifiziert werden. Wie bei Matrizen üblich wird hier auch die erste Koordinate  $u$  für die vertikale Dimension genutzt und die zweite Koordinate  $v$  entsprechend für die horizontale Dimension. Der Grauwert eines Pixels ist durch die Funktion  $g(u, v)$  gegeben.

### 2.1.1.2 Kantendetektion mittels erster Ableitung

Eine Kante in einem Bild entspricht einer starken Grauwertänderung entlang einer Richtung, wobei die angrenzenden Gebiete jeweils möglichst homogen sein sollten. Die Grauwertfunktion weist also eine starke Änderung auf, weshalb sich Ableitungsoperatoren im Grundsatz sehr gut nutzen lassen, um eine Kante zu detektieren. Die erste Ableitung weist ein Maximum auf, die zweite Ableitung einen Nulldurchgang.

Dabei sollte ein guter Kantendetektor natürlich jede Kante in einem Bild erkennen und möglichst wenige falsch-positive Ergebnisse haben.

Außerdem sollte die Kante möglichst genau im Bild lokalisiert werden können [13].

Eine Ableitung im diskreten Raum wird statt Differenzieren durch einfache Differenzen gebildet. Aus den beiden Ableitungen in Richtung  $u$  und  $v$  lässt sich dann der Gradientenbetrag errechnen:

$$\|\nabla g(u, v)\| = \sqrt{\left(\frac{\partial g(u, v)}{\partial u}\right)^2 + \left(\frac{\partial g(u, v)}{\partial v}\right)^2}.$$

Dieser ist ein Maß für die Stärke der Grauwertänderung [7]. Mit einem Schwellwert können dann Kanten bestimmt werden. In verrauschten Bildern führt diese Art der Kantendetektion aber zu vielen Fehlerkennungen. Ein anderes gebräuchliches und deutlich weniger störungsanfälliges Verfahren ist der Einsatz eines differenzierten Gauß-Tiefpass-Filters [7]. Der Gauß-Tiefpass

$$h_{\text{Gauß}}(u, v) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{\|(u, v)\|^2}{2\sigma^2}\right),$$

mit  $\sigma^2$  als Varianz, wird differenziert und zur Approximation von  $\nabla g(u, v)$  eingesetzt:

$$\nabla g(u, v) \approx \nabla h_{\text{Gauß}}(u, v) * g(u, v).$$

Diese Faltung entspricht einer Glättung mit anschließender Ableitung [7]. Die oben bereits erwähnten Kriterien aus [13], nämlich geringe Fehlerkennungen und hohe Lokalisierungsgenauigkeit, lassen sich auch mathematisch formalisieren. Eine numerische Optimierung der Kriterien resultiert im sogenannten Canny-Filter, für das der differenzierte Gauß-Tiefpass eine gute diskrete Näherung darstellt [13].

### 2.1.1.3 Kantendetektion mittels zweiter Ableitung

Die zweite Ableitung des Bildes lässt sich recht einfach durch ein Laplace-Filter approximieren. Dieses nimmt keine Glättung vor und ist entsprechend anfällig für Rauschen [7]. Ein Weg, um Rauschen zu unterdrücken, ist die Vorverarbeitung des Bildes mit einem Gauß-Tiefpass und anschließender Anwendung des Laplace-Filters [60]. Dies wird als *Laplacian-of-Gaussian-Operator* bezeichnet. Zur diskreten Implementierung kann das

*Difference-of-Gaussian* (DoG) Verfahren genutzt werden. Dafür wird ausgenutzt, dass sich der *Laplacian-of-Gaussian-Operator* als Differenz von zwei Gauß-Funktionen mit verschiedenen Standardabweichungen annähern lässt [7].

Ein großer Nachteil von Verfahren zur Kantendetektion mittels der zweiten Ableitung ist, dass ein Nulldurchgang der zweiten Ableitung eine notwendige, aber keine hinreichende Bedingung für eine Kante darstellt und so Fehler in der Kantendetektion passieren können. Der wesentliche Vorteil im Vergleich zu Verfahren, die die erste Ableitung nutzen, ist die hohe Lokalisierungsgenauigkeit, die aus der eindeutigen Position der Nullstellen resultiert [7].

#### 2.1.1.4 Eckendetektion durch den Harris Corner Detector

Die Grundidee des *Harris Corner Detectors* ist es, ein Fenster über das Bild zu legen und ein kleines Stück zu bewegen. Ob eine Ecke vorliegt, wird daran entschieden, wie der Intensitätsunterschied zwischen dem originalen Fenster und dem verschobenen Fenster genau aussieht. Gibt es keine großen Änderungen, ist weder eine Kante noch eine Ecke vorhanden, gibt es große Änderungen in einer Richtung, liegt eine Kante vor, nämlich rechtwinklig zur Richtung der größten Änderung. Liegen große Änderungen in allen Richtungen vor, handelt es sich um eine Ecke [33].

Diese qualitative Darstellung lässt sich wie folgt formalisieren. Der Intensitätsunterschied  $E_g$  lässt sich abhängig von der Verschiebung um  $(x, y)$  und dem betrachteten Fenster  $w(u, v)$  darstellen als:

$$E_g(x, y) = \sum_{(u,v)} w(u, v) (g(u + x, v + y) - g(u, v))^2.$$

Diese Funktion ist allerdings aufwendig zu berechnen für alle Bildpunkte, weshalb sie durch Taylor-Expansion angenähert wird. In Matrixschreibweise ergibt sich dann:

$$E_g(x, y) = (x, y)\mathbf{M}(x, y)^T, \text{ mit } \mathbf{M} = \begin{pmatrix} g_u^2 & g_u g_v \\ g_u g_v & g_v^2 \end{pmatrix},$$

wobei  $g_u$  und  $g_v$  die partiellen Ableitungen in die entsprechende Richtung sind. Die Eigenwerte von  $\mathbf{M}$  seien  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$ .

Im Sinne des oben vorgestellten Ansatzes müssen jetzt beide Eigenwerte groß sein, damit eine Ecke vorliegt. Wenn genau ein Eigenwert klein und der andere groß ist, liegt eine Kante vor. Wenn beide Eigenwerte klein sind, hat das betrachtete Fenster keine Ecke oder Kante und folglich eine eher homogene Grauwertverteilung.

Ein Gütemaß  $R$ , das diese Zusammenhänge ausdrückt, wird in [33] vorgeschlagen:

$$R = \lambda_1 \lambda_2 - k(\lambda_1 + \lambda_2)^2,$$

wobei  $k$  eine Konstante ist. Das Gütemaß  $R$  ist dabei für Kanten negativ und für Ecken positiv. Wenn  $R$  unter einem bestimmten Schwellenwert liegt, handelt es sich um ein Fenster ohne Kanten und Ecken.

### 2.1.1.5 Eckendetektion durch den Shi-Tomasi Detector

Zwischen dem Harris Corner Detector und dem *Shi-Tomasi Detector* [73] gibt es große Parallelen [84]. Einzig das Gütemaß wird hier anders gewählt, nämlich:

$$R = \min\{\lambda_1, \lambda_2\}.$$

Hierbei muss das Gütemaß dann größer als ein vorher festgelegter Schwellenwert sein, damit der untersuchte Punkt als Ecke klassifiziert wird. Das Ausgangsproblem des Shi-Tomasi Detectors ist dabei das Auffinden von Ecken, die bei kleinen Bewegungen in einer Bilderabfolge benutzt werden können, um die Bewegung der Kamera durch die Szene festzustellen. Eine möglichst große Anzahl an Ecken zu finden ist hier also nicht das Ziel, sondern nur solche, die mit hoher Wahrscheinlichkeit auch in einem späteren Bild noch als Ecke zu identifizieren sind [73].

## 2.1.2 Transformationen und Projektionen von digitalen Bildern

### 2.1.2.1 Fourier-Transformation von Bildern

Die Fourier-Transformation wird im Allgemeinen eingesetzt um ein Signal  $g(x)$  in die komplexe Funktion  $G(f)$  zu transformieren, die von der

Frequenz  $f$  abhängig ist. Dabei wird das Signal in die beteiligten harmonischen Funktionen unterschiedlicher Frequenzen zerlegt [7]. Die Fourier-Transformation ist durch

$$\mathcal{F}(g(x)) = G(f) = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \exp(-j \cdot 2\pi \cdot f x) dx$$

gegeben.

Eine sehr wichtige Eigenschaft der Fourier-Transformation für die Anwendung in der Bildverarbeitung ist die Umkehrbarkeit. Die inverse Fourier-Transformation ist als

$$\mathcal{F}^{-1}(G(f)) = \int_{-\infty}^{\infty} G(f) \exp(j \cdot 2\pi \cdot f x) df$$

definiert.

Die Grauwertfunktion  $g(u, v)$  eines Bildes kann mittels der zweidimensionalen diskreten Fourier-Transformation (2D-DFT) in die beteiligten Frequenzen zerlegt werden. Die komplexe Funktion  $G(f_u, f_v)$  weist dann ebenfalls Frequenzen für die beiden Dimensionen auf. Bei vektorieller Notation mit  $\mathbf{w} = (u, v)^T$  und  $\mathbf{f} = (f_u, f_v)^T$  ist die Definition der 2D-DFT [7]:

$$\mathcal{F}(g(\mathbf{w})) = G(\mathbf{f}) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\mathbf{w}) \exp(-j \cdot 2\pi \cdot \mathbf{f}^T \mathbf{w}) d\mathbf{w}.$$

Die Transformation des Bildes aus dem Ortsraum in den Frequenzraum kann für die Bildverarbeitung hilfreich sein, da manche Operationen im Frequenzraum einfacher durchzuführen sind. Dies gilt z. B. für die Unterdrückung von frequenzabhängigen Artefakten im Bild oder zur einfacheren Auslegung von Filtern [28]. Mittels der inversen Fourier-Transformation kann das Bild danach in den Ortsraum zurück transformiert werden.

### 2.1.2.2 Parallelprojektion

Die Parallelprojektion ist eine Projektion, bei der das Projektionszentrum im Unendlichen liegt und Punkte im Raum entsprechend auf parallelen Projektionsstrahlen auf einen anderen Raum abgebildet werden [7]. Oftmals werden Punkte aus einem dreidimensionalen Raum auf eine Ebene abgebildet. Die Projektionsstrahlen treffen dabei im Allgemeinen nicht

rechtwinklig auf die Ebene. Falls die Projektionsstrahlen rechtwinklig auf die Projektionsebene fallen, wird auch von einer Orthogonalprojektion gesprochen. Bei der Verarbeitung zweidimensionaler Bilder entspricht eine Orthogonalprojektion entlang der Achsen des Bildes der Summe der einzelnen Pixel in einer Zeile bzw. Spalte [7].

## 2.2 Umgebungsbedingungen und Vorüberlegungen

### 2.2.1 Umgebungsbedingungen von Laserflachbettmaschinen

Es gibt viele Publikationen zu visuellen Methoden zur Erfassung der Form eines Objektes. Welche Methode eingesetzt wird, hängt auch davon ab, welche für die Aufnahme relevanten Umgebungsbedingungen vorherrschen. Für die Erkennung der Auflagestege bedeutet dies, dass das Messsystem mit sich ändernden Lichteinflüssen, Vibrationen der Maschine und unterschiedlichen optischen Eigenschaften der Auflagestege umgehen können muss. Letztere sind z. B. durch die unterschiedliche Reflektivität der Auflagestege verschiedener Materialien oder bei verschiedenen Verschlackungsgraden gegeben. Außerdem müssen physische Änderungen der Auflagestege, also verbogene Spitzen, Verschlackungen, verschweißte Butzen oder inkorrekt eingelegte Auflagestege, richtig erkannt werden.

Die Lichtverhältnisse außerhalb des Maschinenkörpers können nicht beeinflusst werden, da eine Abdunkelung der gesamten Maschine in einer Blechfertigung mit dem An- und Abtransportieren von Blechen nicht praktikabel ist. Dies ist ein Problem, da die möglichen Beleuchtungsszenarien von einer kaum beleuchteten Halle während der Nachtschicht bis zu direktem Sonnenlicht auf der Palette (siehe Abbildung 2.1) reichen.

Auch die möglichen Positionen für Sensoren sind eingeschränkt. Da Blech von den drei offenen Seiten des Palettenwechslers und von oben eingelegt werden können muss, bleiben außen nur Positionen direkt an der Maschineneinhausung übrig. Im Maschinenkörper muss berücksichtigt werden, dass der Schneidkopf ungestört verfahren kann, was ebenfalls die möglichen Positionen stark einschränkt.



**Abbildung 2.1** Sonnenlicht auf der Palette einer LFM.

Ein weiterer Faktor ist der Einfluss des Messsystems auf den Produktionsablauf. Vor allem bedeutet dies, dass die für die Messung benötigte Zeit den Maschinenzyklus als Ganzes möglichst wenig verlängert. Die Maschinenzeiten werden dabei gewöhnlicherweise in Haupt- und Nebenzeit eingeteilt, wobei die Hauptzeit das wirkliche Bearbeiten des Werkstücks bezeichnet. Die Messung der Stege wäre also ein Teil der Nebenzeit.

Darüber hinaus lassen sich die Auflagestege unterschiedlich genau vermessen. Da Stege nur in bestimmten, an der Palette bekannten Stegsteckpositionen eingelegt sein können, reicht es für eine erste Schätzung der Positionen der Auflagestege aus, das Vorhandensein eines Steges festzustellen, was im Folgenden Stegdetektion genannt wird. Ein deutlich genaueres Vorgehen ist selbstverständlich, jede einzelne Auflagestege zu vermessen, was als Spitzendetektion bezeichnet wird.

## 2.2.2 Visuelle Detektionsverfahren

Gegeben die Umgebungsbedingungen in der Blechfertigung, ergeben sich auf den ersten Blick mehrere visuelle Messverfahren als geeignete Kandidaten. Hier sollen kurz vier Messverfahren dargestellt werden.

Die am einfachsten umzusetzende Methode ist die Aufnahme eines einzelnen Bildes und anschließende Detektion von Objekten durch die Bildverarbeitungsalgorithmen. Dieser Ansatz wird insbesondere dann gewählt, wenn das zu erkennende Objekt vorher bekannt ist. Mögliche Algorithmen sind z. B. Texturanalyse, Ecken- und Kantendetektion oder Fourieranalyse. Die so generierten Features können mit klassifizierenden Verfahren, z. B. dem *Matched Filter* zur Stegerkennung genutzt werden [7, 46]. Verfahren mit kontrollierter oder sogar aktiver Beleuchtung sollten besser funktionieren als Verfahren ohne kontrollierte Belichtungs Umgebung. Der große Vorteil an der Aufnahme einzelner Bilder ist die geringe zusätzliche Nebenzeit, die sich auf die Zeit zur Aufnahme eines Bildes beschränkt, also i. d. R. weniger als eine Sekunde. Dies ist nur möglich, wenn die Kamera außen an der Maschine befestigt ist, da es im Maschinenkörper keine Position gibt, von der aus alle Stege zu sehen sind. Auf dem Palettenwechsler kann nach dem Absortieren der geschnittenen Teile und des Restgitters die leere Palette mit allen Stegen aufgenommen werden, bevor ein neues Rohblech auf die Palette gelegt wird.

Eine sehr weit verbreitete Methode zur dreidimensionalen Formerfassung ist die Laser-Triangulation. Dabei wird ein Laserpunkt oder eine Laserlinie auf das Objekt projiziert. Die Position des Lasers wird von einem Kamerasensor detektiert, der in einem festen Winkel und Abstand zum Laser steht. Von der Position, bei welcher der Laser auf dem Kamerasensor wahrgenommen wird, lässt sich auf die Form des Objekts schließen. Dabei sind Genauigkeiten von deutlich unter einem Zehntel Millimeter möglich [9, 18]. Größter Nachteil dieser Methode ist die relativ lange zusätzliche Nebenzeit, da eine Laser-Triangulation immer ein scannendes Verfahren ist. Für eine LFM bedeutet dies, das die Palette ungefähr 20 Sekunden leer sein muss, falls der Antrieb des Palettenwechslers zum Scannen einer Laserlinie genutzt wird. Außerhalb der Maschine wäre auch eine Bewegung der Laserlinie über die stehende Palette denkbar, dort sind aber Fremdlichteinflüsse stärker vorhanden.

Ein weiterer Ansatz zur Erkennung der dreidimensionalen Form eines Objekts ist *Stereo Vision*. Der Ansatz folgt dem menschlichen Sehen, bei dem der perspektivische Unterschied zwischen den zwei Augen genutzt wird, um Informationen über die dreidimensionale Gestalt eines Objekts zu extrahieren [61]. Aus dem Winkel, unter dem derselbe Punkt eines betrachteten Objekts von den beiden Kameras gesehen wird, kann die Distanz dieses Punktes berechnet werden. Das größte Problem hierbei ist, dass derselbe Punkt in den beiden leicht unterschiedlichen Bildern eindeutig identifiziert werden muss, was oft als Korrespondenzproblem bezeichnet wird [7, 65]. Daraus entsteht zur Vermessung der Auflagestege von LFMn auch der größte Nachteil: bei periodischen Strukturen oder wenn es zu Reflexionen kommt, ist das Korrespondenzproblem sehr schwer oder gar nicht zu lösen [42, 52]. Da Auflagestege ausschließlich aus einer periodischen Struktur, nämlich den Spitzen, und aus metallischem Material, das Reflexionen begünstigt, bestehen, erscheint der *Stereo Vision* Ansatz nur bedingt geeignet. Dies konnte in einem Vorversuch bestätigt werden.

In den letzten Jahren hat das *Time-of-flight* Messprinzip deutlich an Einfluss gewonnen, insbesondere im Bereich des autonomen Fahrens [21, 53, 56]. Wie schon der Name sagt, wird von einer Lichtquelle aus ein Lichtbündel auf das Objekt gestrahlt und in einem Sensor detektiert, wann das reflektierte Licht wieder beim Sensor eintrifft. Aus der zeitlichen Differenz und der Lichtgeschwindigkeit lässt sich die Distanz vom Sensor zum Objekt berechnen [52, 65]. Der größte Nachteil dieses Ansatzes ist die geringe Messgenauigkeit. Für Messabstände von 7,5 m bis 10 m liegt die Genauigkeit im einstelligen Zentimeterbereich [31, 52]. Damit ist die Genauigkeit im Vergleich zur Größe der Auflagestege zu gering und um Größenordnungen schlechter als z. B. bei einer Messung mittels Laser-Triangulation.

Da die beiden zuletzt vorgestellten Ansätze keine ausreichende Genauigkeit versprechen, werden die davor vorgestellten Ansätze vertieft. Zunächst wird die Umsetzung eines Messaufbaus zur Laser-Triangulation vorgestellt. Danach wird erst die Objektdetektion auf einfachen Grauwertbildern dargestellt, um dann ein darauf basierendes Verfahren mit aktiver NIR-Beleuchtung zu betrachten.

## 2.3 Stegdetektion mittels Laser-Triangulation

Das Prinzip, eine Distanz durch Berechnungen in Dreiecken zu messen, ist schon lange bekannt. Es beruht darauf, dass ein Dreieck vollständig definiert ist, wenn zwei Winkel und die Länge einer Seite bekannt sind. Beim Messen sind i. d. R. ein Winkel und die Länge einer Seite bekannt und der zweite Winkel wird gemessen.

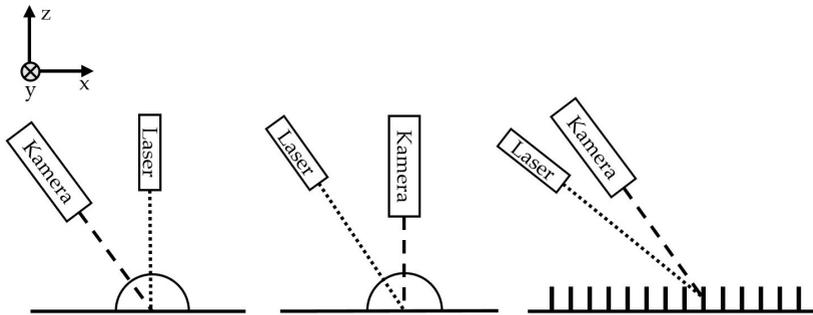
Die Ausführungen dieses Unterkapitels sind in ähnlicher Form schon in [89] veröffentlicht worden.

### 2.3.1 Stand der Technik

Bei einem Laser-Triangulationssystem (LTS) wird ein Laserstrahl als Punkt oder Linie auf die zu messende Oberfläche projiziert. Die Position des Lasers auf der Oberfläche wird mit einer Kamera gemessen. Bei einem üblichen LTS-Aufbau wird der Laser direkt über der zu messenden Oberfläche aufgestellt, sodass der Laserstrahl rechtwinklig zur Oberfläche steht. Die Kamera ist so angebracht, dass ihre optische Achse in einem Winkel zum Laserstrahl steht (siehe Abbildung 2.2 links). Die Bilder, die bei der Vermessung einer Oberfläche entstehen, zeigen also immer das Höhenprofil an einer bestimmten  $x$ -Position. Die Auslenkung der Laserlinie auf dem Kamerasensor hängt direkt mit der Höhe des Messobjekts zusammen. Die Oberfläche wird dann nach und nach gescannt, was mit einem punktförmigen Laser natürlich viel länger dauert als mit einem Linienlaser.

Ein leicht veränderter Aufbau wurde in einer Studie benutzt, bei der es wichtig war, neben dem Höhenprofil auch ein Farbbild des Messobjekts zu erhalten. Deshalb wurde die Anordnung der Kamera und des Lasers vertauscht (siehe Abbildung 2.2 Mitte). So konnten zusätzliche Transformationen bei der Zuordnung von Bereichen des Höhenbildes zu Bereichen des Farbbildes vermieden werden [49].

Ein Problem, das bei der Auswahl jedes LTS-Aufbaus beachtet werden muss, ist Abschattung. Da die meisten Objekte nicht aus einer glatten Oberfläche bestehen, kann es sein, dass entweder Bereiche des Messobjekts nicht von der Position der Kamera aus zu sehen sind, da sie verdeckt werden, oder dass der Laser durch andere Bereiche des Messobjekts verdeckt wird. In abgeschatteten Bereichen kann also nicht gemessen werden. Der Aufbau eines LTS muss folglich ggf. auf das Messobjekt angepasst werden [7].



**Abbildung 2.2** Verschiedene Aufbauten für die Laser Triangulation. Links: Laser rechtwinklig zum Objekt. Mitte: Kamera rechtwinklig zum Objekt. Rechts: Aufbau für diese Arbeit.

### 2.3.1.1 Kalibrierung

Die Kalibrierung eines LTSs kann in zwei Schritte unterteilt werden. Die intrinsische Kalibrierung sorgt dafür, dass mögliche Verzerrungen im optischen System der Kamera korrigiert werden. Durch die extrinsische Kalibrierung wird die Transformation vom Kamerakoordinatensystem zum Weltkoordinatensystem hergestellt [37, 72].

Eine weit verbreitete Methode zur intrinsischen Kalibrierung ist das Lochkamera-Modell. In diesem Modell wird eine perfekte Lochkamera angenommen und die auftretenden Verzerrungen werden anhand der Eckpunkte eines Schachbrettmusters berechnet. Dabei wird die sogenannte Kameramatrix, welche aus den Brennweiten des Objektivs und den Koordinaten des Pixels, der sich auf der Achse des optischen Systems befindet, besteht, berechnet.

In der extrinsischen Kalibrierung wird die korrekte Transformation zwischen Kamerakoordinatensystem und Weltkoordinatensystem berechnet. Dies wird i. d. R. dadurch erreicht, dass ein Kalibrierobjekt mit sehr genau bekannten Abmessungen im LTS vermessen wird [78]. Wenn man ausschließlich an der Höhe des Objekts interessiert ist, ist dies gleichbedeutend mit einer passenden Skalierung der Höhenkoordinate (z. B. in [49]). Die extrinsische Kalibrierung kann eine Fehlerquelle für die Messung sein, wenn das Kalibrierobjekt und das zu messende Objekt nicht sehr ähnliche Oberflächeneigenschaften haben [64].

Die Kalibrierung kann auch in explizite und implizite Methoden aufgeteilt werden. Explizite Methoden versuchen, physikalische Parameter zu bestimmen, wie z. B. die Brennweiten des Objektivs oder die Koordinaten des optischen Zentrums auf dem Kamerasensor. Implizite Methoden hingegen haben ausreichend Parameter, um die möglichen Fehler auszugleichen, diese lassen aber keinen direkten Rückschluss auf die physikalischen Größen des Messsystems zu [37].

### 2.3.1.2 Detektion der Laserlinie

Die Messungsgenauigkeit eines LTS kann verschiedene Gründe haben, die folgenden Kategorien zuzuordnen sind [7]:

- Projektionsqualität der Kameraoptik,
- Projektionsqualität des Lasers,
- Auflösung des Kamerasensors,
- Speckle Noise.

Der letzte dieser Punkte ist im Detail erforscht worden, da es sich dabei um den physikalisch limitierenden Faktor des Laser-Triangulationsprinzips handelt [18, 34]. Die Projektionsqualität der Kameraoptik und die Auflösung des Kamerasensors sind durch die Auswahl der Hardware gegeben. Eine geringe Projektionsqualität des Lasers, also eine relativ breite Linie auf dem Messobjekt, kann bis zu einem gewissen Grad abgemildert werden. Wenn die Laserlinie mehrere Pixel auf dem Sensor belichtet, lässt sich die Position der Laserlinie mit Subpixelgenauigkeit berechnen [66]. Dafür sind in der Literatur mehrere Verfahren bekannt, von denen hier drei vorgestellt werden sollen.

Das Massenschwerpunktverfahren (CoMP) errechnet für jede Spalte des Bildes den Massenschwerpunkt der Grauwerte [45], wobei  $f(r)$  den Grauwert in der Zeile  $r$  bezeichnet. Wenn nur ein klares Maximum in den Daten vorhanden ist, kann das Verfahren auf die gesamte Spalte angewendet werden. Wenn es aber unerwünschte weitere Maxima gibt, kann die Berechnung auch auf einen Bereich zwischen zwei Zeilen  $[k, l]$ , mit

$k < l$  eingeschränkt werden. Die gesuchte subpixelgenaue Position der Laserlinie  $p_{\max}$  kann dann wie folgt berechnet werden:

$$p_{\max} = \frac{\sum_{r=k}^l f(r) \cdot r}{\sum_{r=k}^l f(r)}.$$

Da eine Laserlinie als erste Annäherung eine gaußverteilte Intensität hat, ist es ein weiteres, recht intuitives Verfahren, das Maximum der am besten zu den Grauwerten der Spalte passenden Gauß-Verteilung als Position der Laserlinie zu nehmen. Die Gauß-Verteilung  $h(x)$  ist dabei gegeben durch:

$$h(x) = \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right).$$

Das Maximum  $p_{\max}$  wird bestimmt, indem die Parameter der Gauß-Verteilung variiert und mit den Grauwerten gefaltet werden:

$$p_{\max} = \operatorname{argmax}\{f(r) * h(r)\}.$$

Das Maximum der am besten passenden Gauß-Verteilung wird dann als Position der Laserlinie betrachtet. Dadurch ist die Bestimmung von  $p_{\max}$  mit dem Verfahren der Annäherung einer Gauß-Verteilung (GaussP) im Vergleich zu den vorher vorgestellten Verfahren sehr rechenintensiv.

Ein recht bekanntes weiteres Verfahren ist der nach seinen Erfindern benannte Blais-Rioux-Filter [8]. Dazu wird die Ableitung des Signals gebildet und Rauschen durch einen *Finite Impulse Response* Filter unterdrückt. Der große Vorteil dieses Verfahrens ist die schnelle Berechenbarkeit, was für den ursprünglichen Anwendungsfall von großer Wichtigkeit ist. In der Literatur existieren natürlich noch viele weitere Verfahren, die aber eine untergeordnete Rolle spielen und hier nicht weiter betrachtet werden sollen.

### 2.3.2 Aufbau und Kalibrierung

Es gibt mehrere mögliche Anordnungen zum Aufbau eines LTS zur Vermessung der Auflagestege einer LFM. Um allen Einflüssen einer realen Produktion ausgesetzt zu sein, wurde entschieden, den Aufbau in einer

LFM zu realisieren und nicht ein kleines Stück der Palette in einem Labor für die Tests zu benutzen.

Der gewöhnliche Aufbau eines LTS ist in Abbildung 2.2 links dargestellt. Dieser Aufbau führt wie schon angesprochen zu Abschattungsproblemen bei den äußeren Spitzen. Außerdem enthalten nur sehr wenige Bilder einer Messung tatsächlich nützliche Informationen, schließlich ist zwischen zwei Stegen, die 3 mm breit sind, ungefähr 30 mm Abstand. Dadurch wird bei einer gegebenen Geschwindigkeit des Palettenwechslers die Anforderung an die Bildwiederholfrequenz sehr hoch. Ein besserer Aufbau für diese Messaufgabe ist also so ausgerichtet, dass die Seitenfläche der Stege vermessen wird. Dadurch kann sowohl das Abschattungsproblem umgangen als auch mit jedem Bild nützliche Information gewonnen werden. Ein Nebeneffekt dieses Aufbaus ist, dass die Schlacke an den Stegen besser vermessen werden kann. Der Aufbau ist in Abbildung 2.2 rechts dargestellt.

In einer LFM kommt hinzu, dass der Schneidkopf die Maschine praktisch bis unters Dach ausfüllt, weil zwischen den Kabeln und dem Dach nur wenige Zentimeter Platz sind. Die Kamera und der Linienlaser müssen also oben an der Seite der Maschine angebracht werden (siehe Abbildung 2.3). Eine Messung von unten ist zwar zur Detektion von Stegen möglich, die Spitzen werden dort aber nicht zu erkennen sein. Außerdem könnten die Kamera und der Laser durch Schlackespritzer beschädigt werden.

Die Kamera wurde mit dem in Kapitel 2.3.1.1 vorgestellten Schachbrettmuster-Verfahren intrinsisch kalibriert. Die extrinsische Kalibrierung des Messsystems stellt eine Besonderheit dar, da sie nicht mit einem zusätzlichen Kalibrierobjekt, sondern mit neuen Stegen durchgeführt wird. Dies ist deshalb möglich, weil die neuen Stege mit einer Toleranz von  $\pm 0,05$  mm auf der Maschine selbst geschnitten werden. Dieses Vorgehen bringt zwei Vorteile für die industrielle Anwendung. Erstens ist es so möglich falls notwendig laufend neu zu kalibrieren und zweitens ist kein spezielles Kalibrierobjekt nötig, das ggf. verloren gehen könnte. Eine neue Kalibrierung wird notwendig, wenn der Maschinenkörper verzogen ist, z. B. wenn das Fundament der Halle sich setzt. Außerdem können die Stege aus unterschiedlichen Materialien und Materialqualitäten sein, was deutlichen Einfluss auf ihre optischen Oberflächeneigenschaften hat. Die Oberflächeneigenschaften des Messobjekts können als Fehlerquelle ausgeschlossen werden, wenn die Stege als Kalibrierobjekt genutzt werden [64].

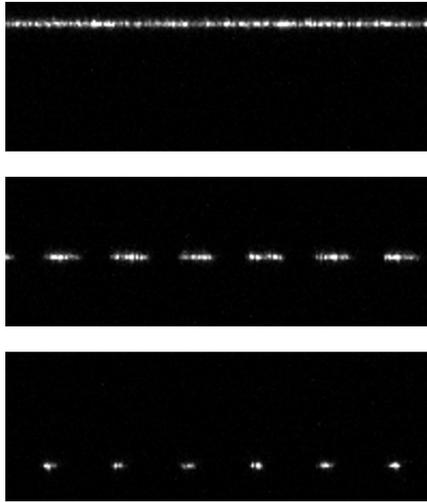


**Abbildung 2.3** Der Laser-Triangulationsaufbau im Innenraum der LFM.

Zur extrinsischen Kalibrierung soll aus den Aufnahmen die Position der Senken und Spitzen bestimmt werden. Von diesen ist durch die bekannte Geometrie der Stege auch die tatsächliche Position bekannt. Aus der Abweichung können dann die Parameter der extrinsischen Kalibrierung errechnet werden.

Um die Position der Senken und Spitzen zu bestimmen, werden die Bilder zunächst mit einem sehr geringen Schwellenwert binarisiert. Dies unterdrückt auch in den Aufnahmen vorhandenes Dunkelrauschen des Kamerasensors. Die Bilder, die zu einem Steg gehören, können eindeutig über einen Schwellenwert identifiziert werden, weil auf ihnen viele Pixel hohe Grauwerte haben. Zwischen zwei Stegen sind immer Aufnahmen, auf denen alle Pixel sehr geringe Grauwerte haben.

Die Bilder eines Steges zeigen zunächst eine durchgehende Linie, die an den Senken aufbricht und gestrichelt ist, bis an den Spitzen nur noch weiße Punkte in einer Linie vorhanden sind (siehe Abbildung 2.4). Die Addition dieser binarisierten Bilder resultiert in einem Bild des gesamten Steges, wie in Abbildung 2.5 oben dargestellt. Anhand dieser Bilder kann die Kontur der Stege mittels *Border Following* [76] festgestellt werden.

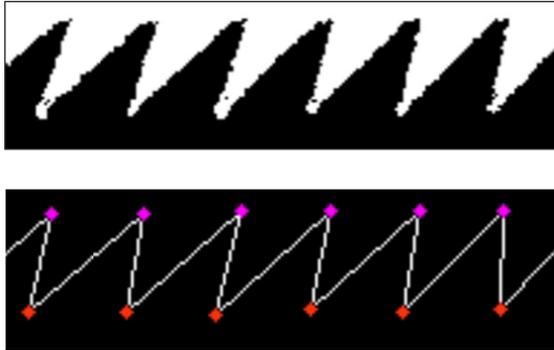


**Abbildung 2.4** Drei Bilder der Aufnahmesequenz eines Steges. Oben: Der untere, vollständige Teil des Steges. Mitte: Unterbrochenes Linienmuster in der Mitte der Auflagespitzen. Unten: Stark ausgedünntes Muster in der Nähe der Spitzen.

*Border Following* bedeutet dabei lediglich, dass die Pixelkoordinaten der Grenze zwischen dem schwarzen und weißen Gebiet ermittelt werden. Die Position der Senken und Stege kann so noch nicht einfach extrahiert werden, da die Kontur in dieser Form zu viel Rauschen enthält. Dieses kann mit dem Ramer-Douglas-Peucker Algorithmus entfernt werden [19, 68]. Dieser Algorithmus prüft für jeden Punkt eines Polygons, ob der Abstand zwischen dem betrachteten Punkt und der direkten Verbindung des Punktes davor und danach einen gegebenen Schwellenwert unterschreitet. Wenn dies der Fall ist, wird der Punkt entfernt und das Polygon verliert eine Ecke. Sonst wird der Punkt beibehalten und der nächste Punkt des Polygons wird geprüft. Dadurch kann das Rauschen effektiv unterdrückt werden.

Als Verfahren zur Detektion von Ecken kommen die in Kapitel 2.1.1 vorgestellten Harris Corner Detector und der Shi-Tomasi Detector in Frage. Letzterer zeigte dabei deutlich bessere Ergebnisse für diese Aufgabe, weil er immer alle wahren Senken und Spitzen finden konnte und gleichzeitig sehr wenige Ecken fälschlicherweise als solche klassifizierte. Deshalb

sind alle weiteren Berechnungen mit dem Shi-Tomasi Detector durchgeführt worden. Die Ergebnisse werden im folgenden Schritt auf Plausibilität geprüft, wobei vor allem die Distanzen zur nächsten Senke bzw. Spitze und die Höhe der erkannten Ecke genutzt werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 2.5 unten dargestellt.



**Abbildung 2.5** Oben: Die aus mehreren Bildern zusammengesetzte Form eines Steges. Unten: Schätzung der Kontur mit dem Shi-Tomasi-Detektor.

Da die Koordinaten der Senken und Spitzen im Bild  $(u, v)$  jetzt bekannt sind, kann die eigentliche Kalibrierung mit zwei Gleichungen angenähert werden. Die erste ist eine perspektivische Transformation, die dazu führt, dass alle Spitzen so dargestellt werden, als hätte man sie direkt von vorne gesehen (siehe Formel 2.1). Das Pixel  $(u, v)$  des Bildes wird dabei auf das Pixel  $(u_{pt}, v_{pt})$  abgebildet, wobei  $n$  ein Skalierungsfaktor ist.

$$\begin{bmatrix} n \cdot u_{pt} \\ n \cdot v_{pt} \\ n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Diese Punkte  $(u_{pt}, v_{pt,w})$  werden dann durch die Matrix  $\mathbf{B}$  in Maschinenkoordinaten transformiert (siehe Formel 2.2).  $w$  ist dabei die Nummer des Bildes in der Aufnahmesequenz.

$$p_{act} = \begin{bmatrix} x_{act} \\ y_{act} \\ z_{act} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{pt} \\ v_{pt} \\ w \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{B} \begin{bmatrix} u_{pt} \\ v_{pt} \\ w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Für jede Spitze und Senke ist durch die bekannte Geometrie der Stege eine als wahr angenommene Position in Maschinenkoordinaten  $p_{gt}$  bekannt. Diese kann von der tatsächlichen Position leicht abweichen, da die Stege beim Einlegen in die Palette einer leichten Torsion ausgesetzt sind. Die Abweichungen bewegen sich im Bereich von ungefähr einem Millimeter.

Die Matrizen  $\mathbf{A}$  und  $\mathbf{B}$  werden nun durch Minimierung der euklidischen Distanzen zwischen allen Punkten  $p_{gt}$  und  $p_{act}$  approximiert:

$$\varepsilon = \sum_{p_{act}} \| p_{gt} - p_{act} \| .$$

Dabei wird ein kombiniertes Verfahren aus *Basin Hopping* [79] für die globale Optimierung und *Sequential Least Squares* [50] für die lokale Optimierung eingesetzt. Die Implementierung stammt aus dem Software-Paket SciPy. Das Verfahren wurde für 15 Iterationen ausgeführt, wobei das Stop-Kriterium für die lokale Optimierung durch  $\varepsilon < 10^{-6}$  gegeben war.

### 2.3.3 Bildverarbeitung und Transformationen

Sobald die Kalibrierung berechnet worden ist, können die Stege vermessen werden, wozu allerdings noch ein paar Bildverarbeitungsschritte und räumliche Transformationen notwendig sind.

Als erstes werden die Bilder auf den Bereich begrenzt, der relevante Informationen enthält, in diesem Fall von  $90 \times 2440$  Pixel auf  $45 \times 1660$  Pixel, was einer Messbreite von ungefähr 755 mm entspricht.

Da die Laserlinie auf vielen Bildern durch die Abstände zwischen zwei Spitzen unterbrochen ist, wird ein Schwellenwert für den maximalen Grauwert einer Spalte gesetzt, der überschritten werden muss, damit die Spalte überhaupt weiter verarbeitet wird. Dann werden zwei von den in Kapitel 2.3.1.2 vorgestellten Liniendetektions-Verfahren eingesetzt, um die Position der Laserlinie subpixelgenau festzustellen. Zum einen ist dies die CoMP Methode, die einmal nur auf die 11 Pixel rund um den maximalen Grauwert beschränkt ist (CoMP11) und einmal auf der gesamten Spalte (CoMP45). Zum anderen wird das GaussP Verfahren getestet, um anschließend diese drei Möglichkeiten vergleichen zu können. Die CoMP Methode wurde dabei gewählt, weil sie in einer anderen Studie besonders gut mit metallischen Reflexionen umgehen konnte [49]. Die GaussP Methode wird als der intuitive Ansatz ebenfalls getestet. Andere Ansätze sind vor allem

auf hohe Berechnungsgeschwindigkeit ausgelegt, was in diesem Fall aber nur eine untergeordnete Rolle im Vergleich zur Genauigkeit spielt, und sollen deshalb im Folgenden nicht weiter betrachtet werden.

Das Ergebnis der Liniendetektionsverfahren ist eine Liste von Messpunkten  $p = [x, y, z]$ . Dabei ist die  $x$ -Koordinate die Nummer des betrachteten Bildes, die  $y$ -Koordinate die Nummer der Bildspalte und die  $z$ -Koordinate das Ergebnis des Liniendetektionsverfahrens für die Bildspalte. Die Variablen  $x$  und  $y$  sind also ganzzahlig, während  $z$  eine Gleitkommazahl ist.

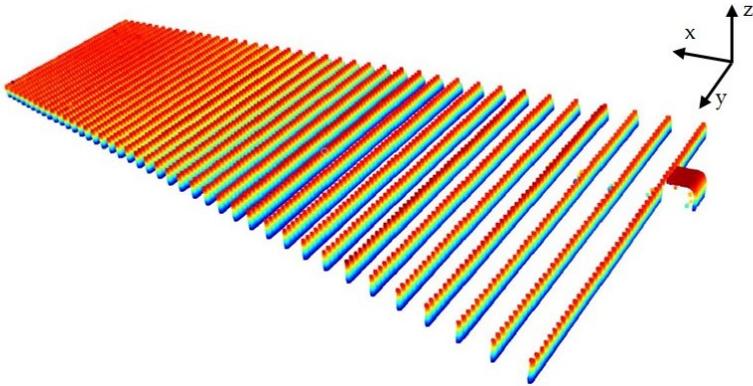
Nun werden die während der Kalibrierung bestimmten Transformationen zur Entzerrung auf den Messpunkten ausgeführt. Da die Kamera und der Laser nicht rechtwinklig zur gemessenen Oberfläche stehen und der Aufnahmezeitpunkt eines Bildes in der Kalibrierung nicht berücksichtigt worden ist, sind die Stege nicht aufrecht in Richtung der  $z$ -Achse, sondern wirken nach hinten gelehnt. Durch den ungewöhnlichen Aufbau des hier implementierten LTS müssen noch zwei räumliche Transformationen durchgeführt werden, die eine geometrische Scherung der Messpunkte bewirken. Zuerst sollen die Stege in Richtung der  $z$ -Achse ausgerichtet werden. Der dafür nötige Winkel  $\gamma$  lässt sich leicht aus der Geschwindigkeit des Palettenwechslers  $v_P$ , der Höhe einer Spitze  $h$ , dem Abstand zwischen der Senke und der Spitze eines Steges in Millimetern  $d$ , der Anzahl an Bildern  $i$  und der Bildrate der Kamera  $f$  errechnen:

$$\gamma = \arctan\left(\frac{h}{d}\right), \text{ mit } d = \frac{v_P}{f} \cdot i.$$

Die Rotation der Punkte  $p$  zu  $p_{rot}$  ist dann durch:

$$\begin{bmatrix} x_{rot} \\ y_{rot} \\ z_{rot} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

gegeben. Die einfache Rotation führt aber dazu, dass die Stege entlang der  $x$ -Achse nicht mehr den richtigen Abstand haben, später aufgenommene Stege höhere Werte in der  $z$ -Dimension haben und in der  $z$ -Dimension gestaucht werden. Diese Probleme können durch eine weitere Transfor-



**Abbildung 2.6** Farblich codierte Höhendarstellung der gesamten Palette, bestehend aus mehreren Millionen Messpunkten.

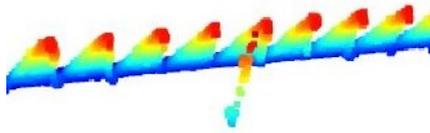
mation behoben werden, deren Ergebnis die korrekten Messpunkte  $p_m$  sind:

$$p_m = \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -x_{rot} \\ y_{rot} + \frac{\sin \gamma}{\cos \gamma} \cdot z_{rot} \\ \frac{z_{rot}}{\cos \gamma} \end{bmatrix}.$$

Das Ergebnis dieser Bearbeitungsschritte ist eine Punktwolke der einzelnen Messpunkte. Ein Beispiel mit ungefähr zwei Millionen Messpunkten ist in Abbildung 2.6 dargestellt.

### 2.3.4 Methode zur Unterdrückung von Reflexionen

Wie schon in Abbildung 2.4 zu sehen ist, sind die Aufnahmen mit Ausnahme der Laserlinie fast vollständig dunkel. Allerdings gibt es an zwei Stellen entlang der Palette immer wieder helle Punkte über der eigentlichen Laserlinie. Diese treten dort auf, wo die Palette zwei Längsträger hat, die die Auflagestege jeweils nach einem Drittel der Palette unterstützen (vgl. auch Abbildung 2.15). Es wird also Licht von den Längsträgern zur Kamera reflektiert, obwohl diese nicht direkt vom Laser angestrahlt werden.

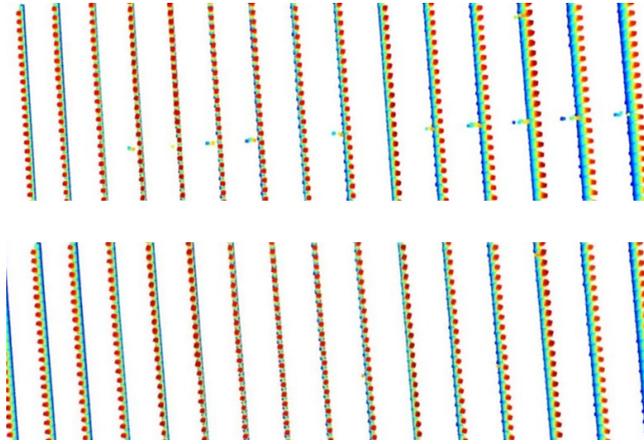


**Abbildung 2.7** Ein Beispiel für ein durch den Längsträger ausgelöstes Artefakt.

Wenn die Aufnahmen wie in den beiden vorhergehenden Unterkapiteln beschrieben bearbeitet werden, führt das zu Artefakten an einer bestimmten  $y$ -Position der Palette. Schließlich wird jeder detektierte Punkt so interpretiert, dass er auf der Ebene des Lasers liegen muss. Dies ist für das Licht vom Längsträger aber nicht der Fall. Die Artefakte sind zylinderförmig und in einem leichten Winkel zum Steg angeordnet (siehe Abbildung 2.7). Ungefähr 75 % der Stege auf den Aufnahmen zeigen diese Artefakte. Die Längsträger sind in der Punktwolke sonst nicht zu sehen, da sie zu tief liegen, um noch detektiert zu werden.

Eine einfache Methode um dieses Problem zu beheben, ist, die Schwellenwerte, ab der eine Spalte überhaupt verarbeitet wird, anzuheben. Die Artefakte sind schließlich recht dunkel im Vergleich zur wirklichen Laserlinie. Dies führt aber zu unerwünschten Effekten an den Flanken und Spitzen der Auflageespitzen, die auch dunkler sein können als die mittleren Teile der Auflageespitzen. Da sonst kein Umgebungslicht im Maschinenkörper nachgewiesen werden konnte, erschien auch der Einsatz eines Schmalbandfilters mit Wellenlänge des Lasers keine geeignete Lösung. Das Licht auf dem Längsträger wird mehrfach reflektiert, wahrscheinlich von den Flanken der Auflageespitzen, die durch die Position des Lasers an der Maschinenseitenwand in einem dafür günstigen Winkel beleuchtet werden.

Da die Artefakte strikt hinter den Auflagestegen auftreten und nicht darüber oder sich überkreuzen, kann die Anzahl an Messpunkten in einem Quader betrachtet werden, der durch die Punktwolke geschoben wird. Dieser erstreckt sich über die gesamte  $z$ -Achse, 30 Pixel in  $y$ -Richtung um die Position des Längsträgers und 5 Pixel in  $x$ -Richtung. Die Schrittweite bei der Verschiebung ist 1,5 Pixel in  $x$ -Richtung. Die Filterantwort ist die Anzahl an Messpunkten im Quader. Falls diese unter einem Schwellenwert, in diesem Fall 50, liegt, werden alle Punkte im Quader gelöscht.



**Abbildung 2.8** Ein Ausschnitt der aufgenommenen Palette. Oben: Vor der Filterung der Artefakte. Unten: Nach Filterung der Artefakte.

Auf den Auflagestegen aufgeschweißte Schneidbutzen haben zwar ähnliche Charakteristika, dafür aber deutlich mehr Messpunkte als die maximal 80 Messpunkte eines der zu filternden Artefakte. Bei der Anwendung auf den Aufnahmen wurden keine Messpunkte entfernt, die nicht zu den Artefakten gehören. Gleichzeitig wurden 99 % der Messpunkte, die zu einem Artefakt gehören, entfernt. Dies ist auch eindeutig in Abbildung 2.8 zu erkennen.

### 2.3.5 Umsetzung

Ein entsprechender Aufbau wurde in einer LFM vom Typ TRUMPF Tru-Laser realisiert (siehe Abbildung 2.3). Während der Aufnahmen wurde die Arbeitsbeleuchtung ausgeschaltet, sodass der Maschineninnenraum dunkel war. Die verwendete Kamera war eine FLIR Blackfly S mit einem monochromen Sony IMX264 CMOS-Sensor. Die Bildhöhe wurde auf 90 Pixelreihen begrenzt, um die Aufnahmegeschwindigkeit auf 150 Bilder pro Sekunde anzuheben. Jedes einzelne Bild hat deswegen eine Abmessung von 90 x 2448 Pixel. Die Kamera wurde mit einem Computar M0824-MPW2

Objektiv mit 8 mm Brennweite kombiniert. Als Linienprojektor kam ein Z-LASER ZM18RF686 mit 640 nm Wellenlänge zum Einsatz.

Der Messaufbau hatte einen Messabstand von ungefähr 880 mm und eine Messbreite von 755 mm, was ziemlich genau die Hälfte der Palette ist. Um die gesamte Palette zu scannen, wären also zwei Kameras oder ein passendes Weitwinkelobjektiv nötig. Die Geschwindigkeit der Palette während des Messvorgangs war ungefähr 70 mm/s.

Jede Konfiguration an Stegen z. B. verschiedene Materialien, stark verschlackte Stege oder verbogene Spitzen wurde zwei Mal aufgenommen: Das erste Mal als tatsächliche Messung ohne die Arbeitsbeleuchtung der Maschine. Beim zweiten Mal wurde die Arbeitsbeleuchtung eingeschaltet, um bei unerwarteten Effekten in den Aufnahmen besser deren Ursprung feststellen zu können.

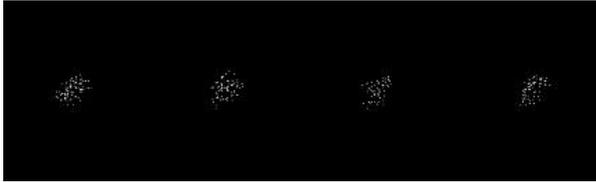
### 2.3.6 Messgenauigkeit des Laser-Triangulationssystems

Bei dem hier vorgestellten LTS haben die Kameraauflösung und die Aufnahmegeschwindigkeit den größten Einfluss auf die Messgenauigkeit. Die Auflösung ist in allen drei Dimensionen ungefähr 0,45 mm/Pixel.

Da es sehr schwer ist, eine Grundwahrheit mit einer ausreichend hohen Auflösung aufzunehmen, wird die Validierung der Messgenauigkeit mit den Stegspitzen selbst durchgeführt. Deren Position ist, solange die Stege neu sind, aus der Steggeometrie bekannt. Dafür sind zwei Ansätze denkbar. Erstens kann die absolute Position der Spitzen über den gesamten Steg betrachtet werden. Zweitens kann der Abstand zwischen jeweils zwei Spitzen betrachtet werden. Letzteres ist deutlich weniger anfällig für eine mögliche Torsion des Steges in den Stegsteckplätzen, die zu einer Abweichung entlang der  $x$ -Achse führen kann, obwohl sich ein Steg natürlich an einer festen  $x$ -Position befindet.

Um von den Daten der Punktwolke zu einer zweidimensionalen Projektion der Stegspitzen zu kommen, wird der Bereich der  $z$ -Achse, in der sich die Stegspitzen befinden, durch Parallelprojektion auf die  $x$ - $y$ -Ebene reduziert. Das Ergebnis dieser Projektion ist ein schwarzes Bild mit weißen Punkten an der Stelle des jeweiligen Messpunktes, bzw. Punktwolken für jede Stegspitze (siehe Abbildung 2.9). Der Schwerpunkt der Punkte-

wolke einer Stegspitze wird für die Validierung als Position dieser Spitze angesehen.



**Abbildung 2.9** Ein Beispiel der zur Validierung genutzten Daten mit Punktwolken von vier Auflagespitzen.

**Tabelle 2.1** Abweichung zwischen der gemessenen und der wahren Position in  $y$ -Richtung in Millimetern.

	CoMP11	CoMP45	GaussP
Durchschnitt	-0,047	0,001	-0,063
Median	-0,090	-0,068	-0,097
Standardabweichung	0,313	0,324	0,317
Minimum	-0,845	-0,713	-0,825
Maximum	0,688	0,789	0,657

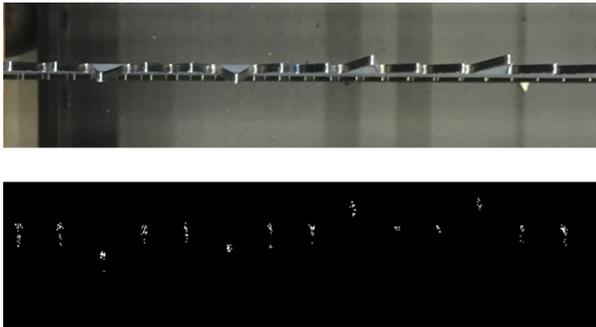
Die Validierung der Messgenauigkeit wurde mit zehn neuen Stegen mit jeweils 51 aufgenommenen Spitzen durchgeführt. Wie oben erwähnt, wird in einem ersten Ansatz die Position der Spitze mit der theoretischen Position dieser Spitze auf der Palette verglichen. Die Resultate für die drei betrachteten Liniendetektionsalgorithmen CoMP11, CoMP45 und GaussP sind in Tabelle 2.1 dargestellt. Der CoMP45 Algorithmus hat dabei die geringste maximale Abweichung mit  $\pm 0,8$  mm. Die Ergebnisse der verschiedenen Algorithmen weichen aber nicht stark voneinander ab, mit Differenzen der maximalen Abweichung von 0,056 mm und 0,036 mm.

Der zweite Ansatz errechnet den Abstand zwischen zwei benachbarten Spitzen als euklidische Distanz. Die Verfahren erreichen mit diesem Ansatz bessere Ergebnisse (siehe Tabelle 2.2). Dies scheint zu bestätigen, dass die Stege eine leichte Torsion aufweisen. Der GaussP Algorithmus hat hier die

kleinste maximale Abweichung, aber die anderen beiden Verfahren sind, wie beim ersten Validierungsansatz auch, nicht signifikant schlechter.

**Tabelle 2.2** Abstand zwischen zwei Auflagespitzen in Millimetern.

	CoMP11	CoMP45	GaussP
Durchschnitt	14,798	14,799	14,797
Median	14,809	14,808	14,797
Standardabweichung	0,167	0,158	0,157
Minimum	14,106	14,191	14,258
Maximum	15,273	15,250	15,171
Differenz (Maximum - Referenzwert)	0,694	0,609	0,542
Differenz (Referenzwert - Minimum)	0,473	0,450	0,371



**Abbildung 2.10** Die vier manuell verbogenen Spitzen. Oben: Aufnahme des Steges von oben. Unten: Der entsprechende Bereich der Punktwolke.

Um die Messgenauigkeit bei Spitzen, die nur wenig verbogen wurden, sicher zu stellen, wurden vier Spitzen manuell absichtlich verbogen (siehe Abbildung 2.10). Die Auslenkung dieser Spitzen konnte nur manuell gemessen werden, was mit einer Genauigkeit von ganzen Millimetern möglich war. Um die Auslenkung einer Spitze in der aufgenommenen Punktwolke zu berechnen, wurden dieselben oben beschriebenen Verfahren der Validierungsansätze verwendet. Die manuellen Messergebnisse und die Messergebnisse des LTS sind in Tabelle 2.3 gegenübergestellt. Die

**Tabelle 2.3** Der Abstand zwischen manuell verbogenen und geraden Spitzen.

Spitze Nr.	Manuelle Messung	LTS Messung
1	-3 mm	-3,33 mm
2	- 3 mm	-3,05 mm
3	2 mm	2,59 mm
4	3 mm	3,59 mm

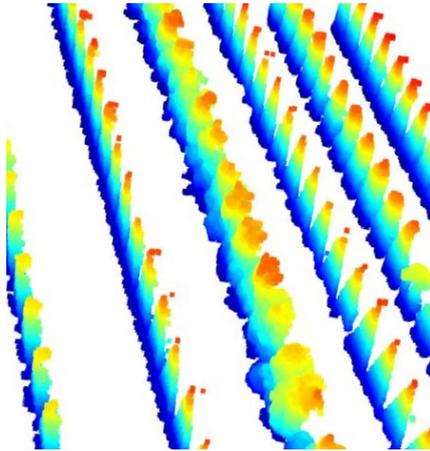
Abweichungen entsprechen der zuvor festgestellten Messunsicherheit mit Werten um  $\pm 0,6$  mm. Auch wenn eine Stichprobengröße von vier Spitzen natürlich statistisch nicht aussagekräftig ist, zeigt sie, dass es keine Probleme gibt, die die Messgenauigkeit an gebogenen Spitzen dramatisch verringern. Als Validierungsansatz ist dieses Vorgehen jedoch nicht sinnvoll, da das Biegen und manuelle Messen von Hunderten von Spitzen nicht durchführbar ist.

### 2.3.7 Robustheit des Laser-Triangulationssystems

Die Robustheit des vorgestellten Messsystems wird anhand der vorher beschriebenen Kategorien – unterschiedliche Stegmaterialien, Verschlackung, verbogene Spitzen, aufgeschweißte Butzen, falsch eingesetzte Auflagestege und Vibrationen – qualitativ bewertet. Die Probleme mit Artefakten, die auf Mehrfachreflexionen zurückzuführen sind, und Methoden zur Milderung dieser Probleme wurden bereits in Abschnitt 2.3.4 diskutiert. Aufgrund des Messaufbaus im Maschinenkörper verursacht das Umgebungslicht keine weiteren Probleme.

Auflagestege können aus verschiedenen Materialien hergestellt werden, meist Kupfer, Edelstahl oder Baustahl. Diese drei Werkstoffe wurden getestet und alle verhielten sich im Grundsatz gleich. Die stärkere Reflexion an der Vorderseite des Stegs, insbesondere bei Edelstahl, führt zu einer allgemein dunkleren Laserlinie, da mehr Licht von der Kamera weg reflektiert wird. Dieser Effekt fällt jedoch eher gering aus und deshalb kann leicht ein geeigneter Schwellenwert gefunden werden, der für alle Materialarten gute Ergebnisse liefert.

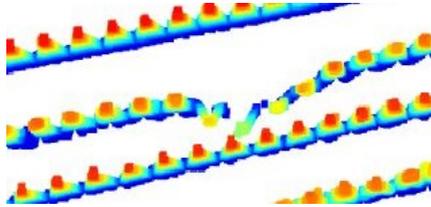
Einige Auflagestege waren stark verschlackt oder zeigten andere Formen von Verschleiß, wie z. B. geschmolzene Spitzen. Ein Beispiel für einen Steg mit Verschlackung ist in Abbildung 2.11 dargestellt. Natürlich wird die Form der Stege nur von vorne vermessen, da sowohl die Kamera als auch die Laserlinie an der Hinterseite abgeschattet sind. Durch die große und unregelmäßige Oberfläche war die Erwartung, dass Reflexionen hier ein Problem darstellen könnten. Dies konnte nicht bestätigt werden.



**Abbildung 2.11** Ein stark verschlackter Steg zwischen zwei neuen Stegen.

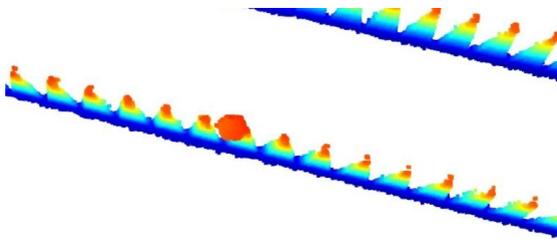
Dass Auflagespitzen nach vorne oder hinten verbogen sind, kommt beim produktiven Einsatz der Maschine oft vor. Dabei ist es für die Betrachtungen dieser Arbeit ausschlaggebend, wie weit eine Spitze verbogen ist. Leicht verbogene Spitzen können durch das LTS gemessen werden (vgl. Tabelle 2.3 und Abbildung 2.10). Manchmal gibt es auch stark verbogene Spitzen, wie z. B. in Abbildung 2.12 gezeigt wird. Auch hier hat das LTS keine grundsätzlichen Probleme mit der Vermessung. Je nach Auslenkungen des verbogenen Auflagesteiges kann es vorkommen, dass die verbogenen Bereiche des Steges durch den Steg davor verdeckt werden. Für das Messergebnis ist dies aber nicht entscheidend, da so stark verbogene Spitzen keine Auflagepunkte für ein Blech darstellen.

Eine weitere Quelle möglicher Probleme sind während des Schneidprozesses auf den Auflageleisten verschweißte Schneidbutzen. Bei auto-



**Abbildung 2.12** Ein stark verbogener Steg zwischen zwei normalen Stegen.

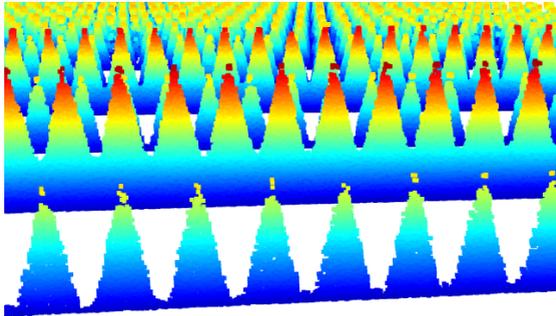
matisierten Anlagen führen sie dazu, dass das nächste Rohblech nicht korrekt auf die Palette gelegt werden kann und durch den Butzen eine Wölbung nach oben bekommt. Dies kann zu vermehrten Vibrationen und Maßungenaugigkeiten führen. In den Aufnahmen ist ein solcher Butzen enthalten (siehe Abbildung 2.13). Die Detektion von aufgeschweißten Butzen ist in der Punktwolke einfach durchzuführen. Dafür muss nur die Anzahl der Punkte im relevanten Bereich der  $z$ -Achse gezählt und mit einem Schwellenwert, der nicht überschritten werden darf, verglichen werden.



**Abbildung 2.13** Ein sechseckiger Butzen, der an einer Stegspitze verschweißt ist.

Da es ein wenig Kraft erfordert, einen Steg in die Stegsteckposition einzulegen und dies bei allen LFMn manuell durchgeführt wird, kann es vorkommen, dass Stege nicht korrekt eingelegt sind und stattdessen zu hoch stehen. Dies führt wie bei Butzen zu einer möglichen Wölbung des Blechs. Genau wie bei auf den Auflagestege verschweißten Butzen kann dies leicht durch einen Schwellenwert im relevanten Bereich der  $z$ -Achse erkannt werden. In Abbildung 2.14 werden zwei solche Stege gezeigt.

Die Bilder wurden auch auf weitere mögliche Anzeichen von abnehmender Robustheit wie z. B. Vibrationen untersucht. Dazu wurden meh-



**Abbildung 2.14** Zwei nicht korrekt eingelegte Stege, deren Spitzen höher stehen als die umgebenden Spitzen.

rere Tests durchgeführt, wie z. B. ob es eine periodische Schwankung der Ausrichtung der Bilder einer Sequenz gibt. Es konnten keine negativen Auswirkungen auf die Messung gefunden werden.

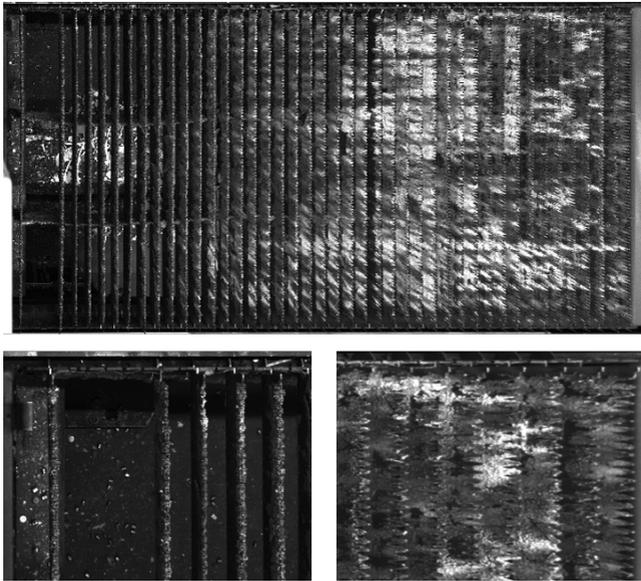
## 2.4 Stegdetektion auf einzelnen Bildern im sichtbaren Spektrum

Im Vergleich zur Laser-Triangulation bietet die Detektion der Stege auf einem einzelnen Bild der gesamten Palette der Flachbettmaschine den Vorteil, dass die Aufnahme weniger Zeit benötigt und sich reibungslos in den Produktionsprozess integrieren lässt, da die Palette nach dem Entfernen der geschnittenen Teile und des Restgitters auf dem Palettenwechsler leer ist. Dieser Moment kann für eine Aufnahme genutzt werden (siehe Abbildung 2.15).

In [86] wurden bereits Teile der Inhalte dieses Unterkapitels publiziert.

### 2.4.1 Detaillierte Problembeschreibung

Bei den Bildern der leeren Paletten sind einige Störeinflüsse zu berücksichtigen, die diese Detektionsaufgabe deutlich erschweren. Da die Kameraposition auf die Rückseite der Maschine beschränkt ist, können die Bilder nie aus der Vogelperspektive aufgenommen werden. Entsprechend sind die

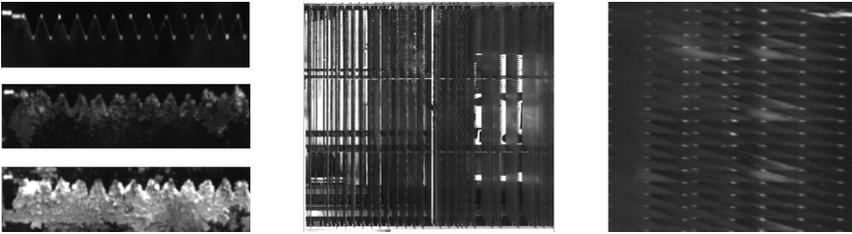


**Abbildung 2.15** Oben: Ein Beispiel eines Bildes der Palette. Die Längsträger sind besonders im linken Drittel zu erkennen. Unten links: Detailausschnitt aus der linken oberen Ecke. Unten rechts: Detailausschnitt aus der rechten oberen Ecke.

vorderen Stege der Palette fast direkt unter der Kamera und werden von oben gesehen (siehe Abbildung 2.15 unten links), während die hinteren Stege deutlich von der Seite gesehen werden (siehe Abbildung 2.15 unten rechts). Dadurch werden auch die verschiedenen Verschlackungszustände bei den hinteren Stegen verstärkt aufgenommen.

Außerdem können auf dem Palettenwechsler die beiden Paletten der Maschine gleichzeitig übereinander stehen. Dann sind durch die obere Palette auch die Stege der unteren Palette sowie Bleche, die möglicherweise auf der unteren Palette liegen, sichtbar. Ein ähnlicher Störeinfluss ergibt sich durch Bleche oder Dreck auf dem Fußboden unter dem Palettenwechsler, der insbesondere durch die vorderen Stege zu sehen ist (siehe Abbildung 2.16).

Ein weiterer störender Faktor sind die unkontrollierten Lichtbedingungen. Da die LFM nicht samt Palettenwechsler eingehaust werden kann, ist



**Abbildung 2.16** Beispiele für die Störeinflüsse auf den Grauwertbildern. Links: Verschiedene Verschlackungszustände. Mitte: Zwei Paletten übereinander, dabei liegt links ein Blech auf dem Boden und rechts ein Blech auf der unteren Palette. Rechts: Die Spitzen und Senken benachbarter Stege sind im rechten Teil des Bildes sehr nah beieinander.

die Qualität der Aufnahmen bis zu einem gewissen Grad von der Beleuchtungssituation in der Produktionshalle abhängig. Hier reicht das Spektrum von spärlichster Beleuchtung während der Nachtschicht bis zu direktem Sonnenlicht auf der Palette zur Mittagszeit.

### 2.4.2 Stand der Technik

Das *Template Matching* ist eine der verbreitetsten Methoden zur Detektion von bekannten Objekten in Bildern. Hierbei wird zuerst eine Schablone erstellt, die entweder aus dem Objekt selbst besteht, wenn dieses nur eine einzige Erscheinungsform hat. Bei Stegen ist dies z. B. auf Grund von Verschlackung und unterschiedlicher Beleuchtung nicht der Fall. Hier kann auch eine gemittelte Erscheinungsform des Objekts herangezogen werden. Die Schablone wird mit dem Bild gefaltet und Ergebnisse über einem gewissen Schwellenwert, bzw. das maximale Ergebnis, werden als Ort des gesuchten Objekts gezählt [7]. Statt einer Faltung, die als Kreuzkorrelation formuliert werden, kann auch die normalisierte Kreuzkorrelation berechnet werden. Letztere ist weniger anfällig für allgemeine Helligkeits- oder Kontrastunterschiede zwischen dem zu untersuchenden Bild und der Schablone und erleichtert die Suche nach einem passenden Schwellenwert [14].

Eine weitere Analyseverfahren, die sich auf die Textur eines Bildbereichs fokussiert, sind Laws' Energiemaße [54]. Solange das gesuchte Objekt eine

deutlich unterscheidbare Textur im Vergleich zu allen anderen Bildbereichen hat, kann dadurch das Objekt erkannt werden.

Laws' Energiemaße bestehen dabei aus einer Menge von quadratischen Matrizen variabler Größe. Am verbreitetsten ist der Einsatz von Matrizen der Größe  $5 \times 5$ , da diese in numerischen Studien die besten Ergebnisse geliefert haben [54]. Die Matrizen werden aus dem dyadischen Produkt von vier Vektoren gebildet, die Geraden ( $\mathbf{l}_5$ ), Hochpunkte ( $\mathbf{s}_5$ ), Wellen ( $\mathbf{r}_5$ ) und Kanten ( $\mathbf{e}_5$ ) repräsentieren:

$$\begin{aligned}\mathbf{l}_5 &= (1, 4, 6, 4, 1)^T, & \mathbf{s}_5 &= (-1, 0, 2, 0, -1)^T, \\ \mathbf{r}_5 &= (1, -4, 6, -4, 1)^T, & \mathbf{e}_5 &= (-1, -2, 0, 2, 1)^T.\end{aligned}$$

Die 16 Matrizen werden jeweils mit dem Bild gefaltet und erstellen dadurch 16 Features. Ein Objekt mit bekannter Textur kann nun in diesen Features gesucht werden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den Durchschnitt oder einen gewichteten Durchschnitt der Matrizen zu bilden und nur dort nach der bekannten Textur zu suchen.

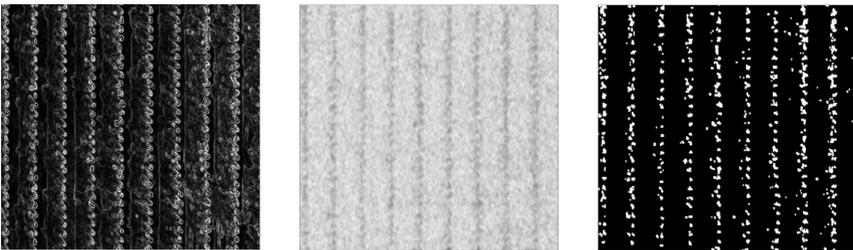
Viele andere bekannte Ansätze aus den letzten Jahren sind für das vorliegende Problem nicht anwendbar. Zum Beispiel hat der SIFT Algorithmus die Objektdetektion bei skalierten und gedrehten Objekten durch eine geschickte Darstellung der Features entscheidend vorangebracht [59]. Die Stege sind in den Bildern aber nie gedreht oder skaliert vorhanden.

Einer der neueren und in der Bildverarbeitung außerordentlich erfolgreichen Ansätze ist eine Klasse von speziellen künstlichen neuronalen Netzen, die *Convolutional Neural Networks* (CNNs). Die ersten Ideen dieses Ansatzes gehen einige Jahrzehnte zurück, aber die ersten Beschreibungen des heute angewandten Konzepts finden sich in den späten 1990er Jahren (siehe z. B. [55]). Aktuelle Beiträge zur Objektdetektion und -lokalisierung mit CNNs wurden in [24] und [35] geleistet. Dabei ist zu beachten, dass für das Training eines CNNs i. d. R. mehrere tausend Trainingsbeispiele notwendig sind, da sie oft eine große Anzahl an Parametern haben. Da nur ungefähr 220 Bilder vorliegen, wurde dieser Ansatz nicht weiter verfolgt.

## 2.4.3 Methoden zur Stegdetektion auf einzelnen Grauwert-Aufnahmen

### 2.4.3.1 Kanten- und Eckendetektoren und Laws' Energiemaße

Die Stege können als eine bestimmte Anordnung von Kanten und Ecken im Bild aufgefasst werden. Deshalb erscheint es sinnvoll, Kanten- und Eckendetektoren zu betrachten. Als Kantendetektoren werden die in Kapitel 2.1 vorgestellten Verfahren mittels differenziertem Gauß-Tiefpass oder DoG als Eckendetektoren, die respektive die erste oder zweite Ableitung der Grauwertfunktion nutzen, verwendet. Als oft gebrauchter Eckendetektor wird der Harris Corner Detector benutzt, der ebenfalls in Kapitel 2.1 vorgestellt wurde, und als Texturanalyseverfahren die im vorhergehenden Abschnitt eingeführten Laws' Energiemaße.



**Abbildung 2.17** Beispiele für drei Features. Links: Differenzierter Gauß-Tiefpass. Mitte: Laws' Energiemaße. Rechts: Binarisierter Harris Corner Detector.

Laws' Energiemaße werden mit Matrizengröße  $5 \times 5$  gebildet. Die Matrix, die aus der Multiplikation von  $I_5$  mit sich selbst entsteht, wird dabei vernachlässigt, da sie nur einen gewichteten Durchschnitt bildet. Nach der Faltung der 15 Matrizen mit dem Bild wird hochfrequentes Rauschen durch Faltung mit einem Gauß-Tiefpassfilter der Größe  $5 \times 5$  gedämpft. Da in Vorversuchen gezeigt wurde, dass die einzelnen Matrizen nur wenig Information enthalten, wird anschließend der Durchschnitt über die 15 Matrizen gebildet.

### 2.4.3.2 Frequenzbasierte Features

Da die Stegspitzen einen regelmäßigen und vorab bekannten Abstand haben, kann das Bild mittels diskreter Fouriertransformation in seine Frequenzen zerlegt und anschließend gesuchte Frequenzen gefiltert werden. Nach einer Rücktransformation sind dann nur noch die Bildanteile enthalten, die der gefilterten Frequenz entsprechen.

Da die Stege gepunktete, vertikale Linien im Bild sind und die Spitzen einen bestimmten Abstand zueinander haben, sind im Fourier-Betragsquadratspektrum horizontale Linien mit schwankender Intensität zu sehen. Die Distanz  $d_1$  der ersten parallelen Linien zur Achse kann aus dem vertikalen Abstand zweier Spitzen  $d_s$ , der Höhe des Bildes  $u_{\max}$  und der Größe eines Pixels  $\Delta u$  berechnet werden:

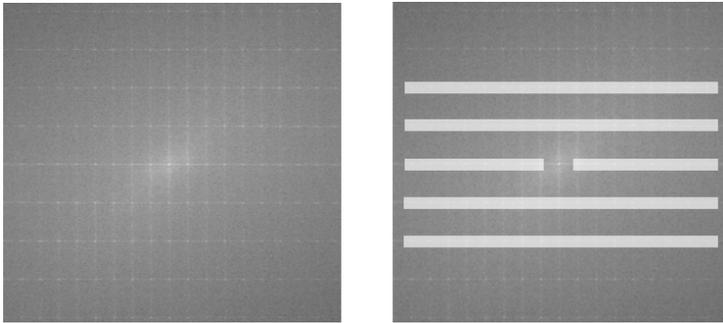
$$d_1 = \frac{1}{d_s} \cdot \Delta u \cdot u_{\max}.$$

Die prognostizierten horizontalen Linien sind in Abbildung 2.18 eindeutig zu erkennen und treten im erwarteten Abstand auf. Die auffälligen Strukturen im Betragsquadratspektrum werden also durch die Stegspitzen ausgelöst. Da es noch weitere Oberschwingungen gibt, die durch weitere parallele Linien erkannt werden können, werden drei Bandpass-Filter (BP1 bis BP3) definiert, um das Signal zu filtern:

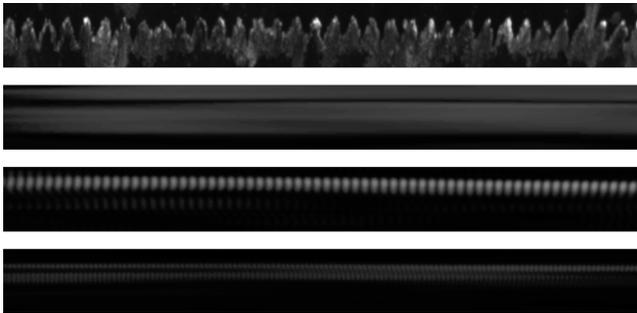
$$\begin{aligned} \text{BP1}(f_x, f_y) &= \begin{cases} 1, & \text{wenn } 30 < |f_x| < e_x \text{ und } |f_y| < 5 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \\ \text{BP2}(f_x, f_y) &= \begin{cases} 1, & \text{wenn } |f_x| < e_x \text{ und } d_1 - 5 < |f_y| < d_1 + 5 \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} \\ \text{BP3}(f_x, f_y) &= \begin{cases} 1, & \text{wenn } |f_x| < e_x \text{ und} \\ & 2 \cdot d_1 - 5 < |f_y| < 2 \cdot d_1 + 5 \\ 0, & \text{sonst.} \end{cases} \end{aligned}$$

Die Ausdehnung der Filter ist dabei durch eine Grenze  $e_x$  gegeben, da die Energie des Signals für höhere Frequenzen abnimmt. Aus dem selben Grund werden auch nur drei Filter betrachtet. Die Bandpass-Filter sind in Abbildung 2.18 als weiße Overlays eingezeichnet.

Nach der Filterung werden die Bilder in den Ortsbereich zurück transformiert, wodurch ein Bild entsteht, das nur noch die gefilterten Frequenzen enthält. Ein Beispiel ist in Abbildung 2.19 zu sehen.



**Abbildung 2.18** Links: Das Betragsquadratspektrum eines Bildes mit Stegen. Rechts: Dasselbe Betragsquadratspektrum mit den drei Bandpassfiltern als weiße Overlays.



**Abbildung 2.19** Resultat der Filterung im Frequenzbereich. Von oben nach unten: Grauwertbild, Filterung mit BP1, Filterung mit BP2, Filterung mit BP3.

### 2.4.3.3 Template Matching Klassifikator

Template Matching basiert auf der Faltung einer Schablone mit dem Bild. Die Schablone muss im vorliegenden Anwendungsfall also geeignet sein, um alle Stege zu erkennen, und darf trotzdem gleichzeitig nicht zu anfällig für Störeinflüsse sein.

Die Schablonen für das Template Matching wurden alle von Hand erstellt und auf den jeweiligen Merkmalsraum angepasst. Bei den einfachen Grauwertbildern kommt das Bild eines neuen Steges aus der Mitte der Palette zum Einsatz. Bei den Fourier-Features kommen sowohl ein Bandpassfilterter Steg (BP2 Steg) zum Einsatz als auch zwei binäre Schablonen

( $BM_1$  und  $BM_2$ ), die anhand der geeigneten Breite der Stege  $w_s$  folgendermaßen definiert sind:

$$BM_1(u, v) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } \frac{1}{3}w_s < v < \frac{2}{3}w_s \\ 0, & \text{wenn } 0 \leq v \leq \frac{1}{3}w_s \text{ und } \frac{2}{3}w_s \leq v < w_s \end{cases}$$

$$BM_2(u, v) = \begin{cases} 1, & \text{wenn } v < \frac{1}{2}w_s \\ 0, & \text{wenn } \frac{1}{2}w_s \leq v < w_s. \end{cases}$$

Sie sollen die Erscheinung von Stegen im gefilterten Bild nachahmen, nämlich zum einen einen hellen vertikalen Streifen zwischen zwei dunklen Bereichen und zum anderen einen hellen vertikalen Streifen, bei dem nur rechts ein dunkler Bereich anschließt. Letzteres ist der Tatsache geschuldet, dass bei Stegen im rechten Bereich des Bildes nicht nur die Spitzen, sondern auch die Senken sichtbar sind und aufgrund der Distanz zwischen Senken und Spitzen auch ein sehr schmaler dunkler Streifen zwischen den Spitzen und Senken eines Stegs vorhanden sein kann. Ein symmetrisches Template wie  $BM_1$  kann dann dazu führen, dass fälschlicherweise zwei Stege erkannt werden. Entsprechend ist der Ansatz bei  $BM_2$  nur dann positiv zu klassifizieren, wenn neben einem hellen Streifen auch ein dunkler Streifen mit mindestens halber Stegbreite folgt. Entsprechend lässt sich auch das Template eines bandpass-gefilterten Steges anpassen. Hier wird dem bestehenden Template einfach ein schwarzer Streifen rechts angefügt, was im Folgenden auf Grund der Asymmetrie als „Asym. BP2 Steg“ abgekürzt wird.

Um die Ähnlichkeit zwischen der Schablone und dem Bild zu bewerten, wird die normalisierte Kreuzkorrelation benutzt. Das Resultat ist ein ein-dimensionales Signal. Da Stege nur alle 33,5 mm vorhanden sein können, wird gefordert, dass ein Steg ein lokales Maximum im Bereich  $\pm 15$  mm um die detektierte Position ist. Um bei unbesetzten Stegpositionen keine Fehldetektionen zu erhalten, muss außerdem ein gewisser Schwellenwert überschritten werden.

#### 2.4.3.4 Parallelprojektions-Klassifikator

Ein weiterer möglicher Klassifikator entsteht durch die Parallelprojektion. Da die Stege in erster Näherung als vertikale Linien in den Bildern dargestellt sind, ist es möglich, eine Parallelprojektion entlang der Stege

durchzuführen und aus dem entstandenen Signal die Spitzen zu klassifizieren.

Letzteres ist allerdings kein einfaches Problem, da das Signal, das aus der Parallelprojektion resultiert, z. B. durch Beleuchtungsunterschiede oder durch hellere Schlacke auf den Stegen beeinflusst wird. Hier wird die in [20] vorgestellte Wavelet-Transformation basierte Pattern-Matching Methode verwendet, um die Maxima zu detektieren. Dazu wird zuerst die Faltung von diskreten Ricker Wavelets mit 20 verschiedenen Breiten mit dem Signal berechnet. Die Ergebnisse dieser Faltung werden in einer Matrix festgehalten, wobei jede weitere Zeile das nächst größere Wavelet enthält und jede Spalte zu der entsprechenden Stelle des diskreten Signals gehört. Dann werden in der Matrix die Maxima in jeder Reihe mit denen in den benachbarten Reihen verglichen und Maxima über mehrere Reihen hinweg zu sogenannten *Ridge Lines* zusammengefasst. Diese *Ridge Lines* werden dann einem Pattern-Matching unterzogen, um Stege aus den möglichen Maxima zu detektieren. Dazu wird die Form und Länge der jeweiligen *Ridge Line* herangezogen.

Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass Maxima verschiedener Höhe leicht erkannt werden können und die Form der Maxima berücksichtigt wird, was zu einer höheren Informationseffizienz führt [20].

### 2.4.3.5 Transformation in Stegpositionen

Ein Steg kann nur an ganz bestimmten Positionen auf der Palette sein, da es regelmäßige Stegsteckplätze gibt. Daher ist eine Transformation von der Bildspalte eines erkannten Steges auf einen Stegsteckplatz notwendig. Bei der später präsentierten Umsetzung handelt es sich um 3100 Bildspalten und 93 Stegsteckplätze. Da die Palette in jedem Bild unterschiedlich ausgerichtet ist, muss zunächst die Position des Blechanschlags  $x_{\text{stop}}$  erkannt werden. Die Distanz zwischen dem Blechanschlag und dem ersten Stegsteckplatz ist ungefähr gleich der Distanz zwischen zwei Stegsteckplätzen  $d_{\text{st}}$ . Die Position des Blechanschlags ist als Referenzpunkt also ausreichend und wird mittels Template Matching in einem definierten Bereich in der entsprechenden Ecke des Bildes festgestellt. Die Schablone dafür wird für jede Maschine neu von Hand erstellt.

Der Stegsteckplatz  $n \in \{1, 2, \dots, 92, 93\}$  einer bestimmten Bildspalte  $v_n$  kann durch:

$$n = \text{nint} \left( \frac{v_n - x_{\text{stop}}}{d_{\text{st}}} \right)$$

berechnet werden.

## 2.4.4 Umsetzung, Ergebnisse und Diskussion

Die Aufnahme der Bilder wurde an LFMn der Baureihen TRUMPF TruLaser 3000 und 5000 gemacht, deren Palettenwechsler fast identisch aufgebaut sind. Insgesamt wurden 215 Bilder verwendet, wovon 27 Bilder von einer Testmaschine bei TRUMPF Werkzeugmaschinen stammen und 188 Bilder von Blechfertigern.

Der Kameraarm war dabei an der Maschinenrückseite angebracht, so dass die gesamte Palette mit einer Kamera betrachtet werden kann (siehe Abbildung 2.20).



**Abbildung 2.20** Die Position des Kameraarms an der Maschine.

Die Ergebnisse der Methoden bei Benutzung der Parallelprojektion bzw. des Template Matchings als Grundlage der Klassifizierung sind in den Tabellen 2.5 und 2.4 zu sehen. Dabei ist die *Accuracy* wie in Formel 2.3

**Tabelle 2.4** Ergebnisse der verschiedenen Features bei Klassifizierung auf Grundlage des Template Matching.

Feature	Template	RPR	RNR	Accuracy
Grauwerte	Neuer Steg	0,204	0,642	0,434
BP2	BP2 Steg	0,948	0,948	0,948
BP2	Asym. BP2 Steg	0,966	0,958	0,961
BP1	BM <sub>1</sub>	0,764	0,715	0,738
BP2	BM <sub>1</sub>	0,921	0,857	0,887
BP3	BM <sub>1</sub>	0,930	0,870	0,898
BP1	BM <sub>2</sub>	0,416	0,649	0,538
BP2	BM <sub>2</sub>	0,926	0,947	0,937
BP3	BM <sub>2</sub>	0,922	0,930	0,926

definiert. Die Klassifikationsergebnisse sind mit ihren Anfangsbuchstaben abgekürzt, sodass z. B. RP für richtig positiv und FN für falsch negativ steht. Die Richtig Positiv Rate (RPR) ist dabei der Anteil der positiven Instanzen, die korrekt als solche erkannt wurden. Die Richtig Negativ Rate (RNR) ist analog definiert.

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{RP} + \text{RN}}{\text{RP} + \text{FP} + \text{FN} + \text{RN}} \quad (2.3)$$

Grundsätzlich schneiden die Fourier-Features deutlich besser ab als jede andere Methode, mit einer Accuracy von i. d. R. rund um 90 %. Die nächst beste Methode ist DoG mit 72,5 % Accuracy. Grauwerte ohne weitere Features zu benutzen, funktioniert mit Parallelprojektion besser als mit Template Matching. Letzteres ist mit einer Accuracy von 66,7 % eine der schlechteren Methoden. Dies zeigt, dass kein gutes Template gefunden werden kann, was dafür spricht, dass die Störeinflüsse tatsächlich eine große Rolle spielen.

Ähnlich verhält es sich mit den Ecken- und Kantendetektoren, die zu oft durch Rauschen, entweder durch Strukturen unter der Palette oder durch verschlackte Stege, zu fehlerhaften Detektionen gelangen. Sie erreichen nur eine Accuracy zwischen 49,7 % und 72,5 %. Hier zeigt sich, wie sensibel Verfahren sind, die den Spitzenabstand nicht berücksichtigen können.

**Tabelle 2.5** Ergebnisse der verschiedenen Features bei Klassifizierung auf Grundlage der Parallelprojektion.

Feature	RPR	RNR	Accuracy
Grauwerte	0,860	0,486	0,667
BP1	0,855	0,412	0,625
BP2	0,916	0,655	0,781
BP3	0,897	0,805	0,850
Laws Energy Measures	0,903	0,453	0,670
Harris Corner Detector	0,605	0,396	0,497
DoG	0,880	0,581	0,725
Differenzierter Gauß-Tiefpass	0,807	0,336	0,562

Die meisten Fehler werden bei jedem Verfahren im rechten Drittel des Bildes gemacht. Die Fehlerkurve steigt insbesondere im hinteren Drittel deutlich an. Dies ist unabhängig von den eingesetzten Methoden, sodass auch mit Informationsfusionsverfahren kein Fortschritt erzielt werden kann. Eine erste Vermutung könnte sein, dass es einen Zusammenhang zwischen der durch die perspektivische Transformation des aufgenommenen Bildes in diesem Bereich geringere Auflösung und den Fehlklassifikationen gibt. Bei der Angleichung der Auflösung über das gesamte Bild wird allerdings nicht im letzten Bereich interpoliert, sondern die Auflösung des vorderen Bereichs herabgesetzt. Die Auflösung liegt mit 1 mm pro Pixel auch deutlich über dem Spitzenabstand von 14,8 mm. Obwohl zu erwarten wäre, dass die Fehldetektionen abnehmen, wenn die Schablonen gezielt aus diesem Bereich der Palette stammen, ist dies nicht der Fall. Der Grund dafür ist wahrscheinlich, dass insbesondere in diesem Teil der Palette die Seiten der Stege gut zu sehen sind und damit auch der Verschlackungszustand einen großen Einfluss hat. Ebenso führt die perspektivische Überlappung von aufeinander folgenden Stegen in diesem Bereich des Bildes zur Verwechslung von Stegsenken und Stegspitzen.

## 2.5 Stegdetektion durch schmalbandige Nahinfrarot-Aufnahmen

Die im vorhergehenden Kapitel angesprochenen Probleme haben zu nicht unerheblichen Teilen mit der unkontrollierten Beleuchtungssituation zu tun. Die Beleuchtung ist bei vielen Anwendungen der automatischen Sichtprüfung entscheidend für Robustheit und Geschwindigkeit der Auswertung [30]. Der Ansatz einer NIR-Dunkelfeldbeleuchtung soll die störenden Fremdeinflüsse bei Einzelbildern reduzieren. Dadurch sollten auch Aussagen über den Zustand einzelner Spitzen möglich werden, während gleichzeitig die Auswertungsgeschwindigkeit steigt. Da nicht die gesamte Form der Stege, sondern nur die Position der Spitzen von Interesse für die Messaufgabe ist, ist ein Bild der Palette denkbar, das im Hintergrund vollständig schwarz ist und nur die Spitzen als weiße Punkte in geraden Linien zeigt. Dies ist das Ziel der vorgeschlagenen NIR-Dunkelfeldbeleuchtung. Die Auswertung eines solchen Bildes ist offensichtlich mit einfachen Algorithmen möglich, die im Folgenden vorgestellt werden.

Die in diesem Unterkapitel dargestellten Inhalte sind in ähnlicher Form bereits in [88] veröffentlicht worden. Um eine bessere Lesbarkeit zu erreichen, wird auf wörtliche Zitate dieser Publikation verzichtet.

### 2.5.1 Stand der Technik

Die Dunkelfeldbeleuchtung ist in der automatischen Sichtprüfung ein oft benutztes Inspektionsverfahren [1, 7]. In einem üblichen Aufbau wird die Beleuchtung in einem sehr flachen Winkel bezüglich der zu überprüfenden Oberfläche platziert, über der senkrecht die Kamera steht. Das meiste Licht wird nicht zur Kamera geleitet, sondern in einem flachen Winkel von der Beleuchtung weg, wodurch ein dunkles Bild entsteht. Defekte in der Oberfläche streuen das Licht, das so in die Kamera geleitet wird. Defekte erscheinen also heller als ihre Umgebung.

In [1] wird diese Beleuchtungsart gewählt, um Defekte in Stoffgeweben vor der Produktion feststellen zu können. In einer anderen Studie wurde die Dunkelfeldbeleuchtung gewählt, um ein dünnes Gewebe zu erfassen und daraus die besten Schneidwege des Werkzeugs zu bestimmen [4]. Ein ebenfalls flächiges Ausgangsmaterial, nämlich ein Separator für

Lithium-Ionen-Batterien, wurde in [43] betrachtet. Hier wurde neben der Dunkelfeldaufnahme auch eine Hellfeldaufnahme durchgeführt und die gewonnene Information hinterher zur Defektdetektion zusammengeführt.

Andere Studien benutzen die Dunkelfeldbeleuchtung auch im nicht sichtbaren Spektrum. In [23] werden Bilder von Composit-Materialien mit Röntgen-Strahlung aufgenommen. Die Proben wurden vorher starker mechanischer Belastung unterzogen, um die Kollision eines Bauteils mit einem Gegenstand zu simulieren. Die entstandenen Bilder können genutzt werden, um Defekte im Composit-Material, die durch die mechanische Belastung ausgelöst wurden, zu detektieren.

Die Unterdrückung von Fremdlichteinflüssen bei automatischen Sichtprüfungsaufgaben ist ein breit erforschtes Gebiet. In [57] wurde zur Unterdrückung von Fremdlichteinflüssen im sichtbaren Spektrum bei der Gesichtserkennung eine schmalbandige Aufnahme und eine Beleuchtung im nahen Infrarot benutzt. Der Vorteil einer NIR-Beleuchtung ist, dass die Unterdrückung von Fremdlichteinflüssen durch Sonnenlicht oder künstliche Beleuchtung auch ohne Einhausung sichergestellt werden kann.

Für die Assistenzsysteme von Automobilen sind NIR-Beleuchtungen ebenfalls betrachtet worden. So kann durch eine aktive NIR-Beleuchtung mit bestimmten Wellenlängen eine recht genaue Sichtweitschätzung abgegeben werden, ohne dabei durch Sonnenlicht gestört zu sein oder nachts durch sichtbare Beleuchtung die Verkehrsteilnehmer zu stören [12].

Arbeiten über den Einsatz von NIR-Beleuchtung zur Maschinenüberwachung oder anderen Aufgaben in der Blechfertigung sind dem Autor nicht bekannt.

## **2.5.2 Konstruktion einer schmalbandigen NIR-Dunkelfeldbeleuchtung**

Der Aufbau einer schmalbandigen Dunkelfeldbeleuchtung an einer LFM soll vor allem zwei Probleme lösen. Erstens soll mittels der schmalbandigen NIR-Komponente Fremdlicht sehr gut unterdrückt werden, sodass eine Dunkelfeldbeleuchtung ohne Einhausung ermöglicht wird. Zweitens soll durch die Dunkelfeldbeleuchtung die Analyse der Bilder sehr viel einfacher und dadurch auch schneller möglich werden. Die angestrebte Aufnahme ist zum Großteil schwarz und zeigt die Spitzen eines Steges als helle Punkte.

Die Umsetzung einer schmalbandigen NIR-Beleuchtung und -Aufnahme ist durch eine entsprechende Beleuchtung und Filter vor dem Kameraobjektiv möglich. Um eine möglichst gute Fremdlichtunterdrückung zu erzeugen, sind die Wellenlängen 850 nm und 940 nm besonders geeignet, da sie auf der Erdoberfläche Bandlücken im Spektrum des Sonnenlichts sind. Dies hängt mit der Absorption durch Wassermoleküle in der Atmosphäre zusammen [32]. Deshalb sind diese Wellenlängen auch in der Sicherheitstechnik verbreitet und entsprechende Filter verfügbar.

Die Konstruktion einer Dunkelfeldbeleuchtung für die Palette einer LFM unterliegt mehreren Anforderungen. Die Kamera muss an der Rückwand der Maschine angebracht werden, da die drei anderen Seiten sowie der Raum über der Palette für Be- und Entladeprozesse der Maschine zur Verfügung stehen müssen. Die Lichtquelle muss zum einen oberhalb der Stegspitzen positioniert werden, damit reflektiertes Licht nach oben zur Kamera geleitet wird. Zum anderen darf die Lichtquelle nicht in einem zu steilen Winkel von oben auf die Palette gerichtet sein, da sonst Gegenstände, die sich unter der Palette befinden, beleuchtet werden könnten.

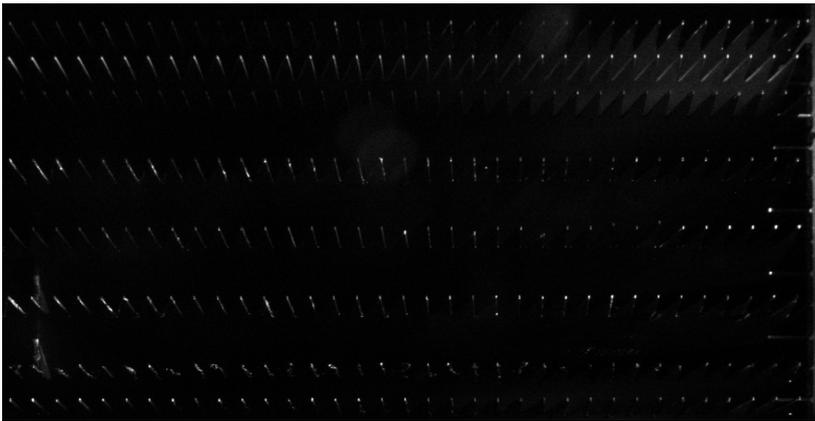
Außerdem darf die Lichtquelle nicht die der Kamera zugewandte Seite der Stege beleuchten. Sonst entstehen Bilder, die Bildern aus dem sichtbaren Spektrum sehr ähnlich sind und entsprechend auch die in Kapitel 2.4 angesprochenen Probleme bei der Auswertung haben.

Die Beleuchtung muss also seitlich, in einem flachen Winkel von oben und hinten erfolgen (vgl. Abbildung 2.24). Tests haben gezeigt, dass es zu teilweise starken Blendenflecken kommt, wenn Licht direkt von der Beleuchtung in die Kameraoptik gelangen kann. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn sich die Beleuchtung auf der der Kamera gegenüberliegenden Seite der Palette befindet. Die Beleuchtung muss dann mit entsprechenden Abdeckungen versehen werden.

### **2.5.3 Auswertungsmethoden für schmalbandige NIR-Aufnahmen**

Durch die Position der Kamera sind die Aufnahmen perspektivisch verzerrt. Stege und Stegspitzen, die weiter vorne auf der Palette sind und damit im Bild weiter unten erscheinen, sind größer dargestellt als Stege und Stegspitzen weiter hinten. Die nötige Entzerrung kann mit einer

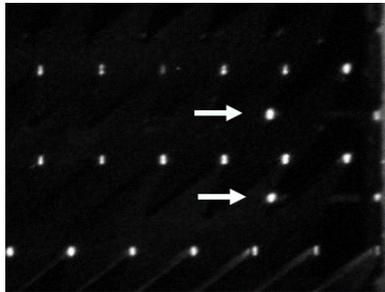
Homografie durchgeführt werden. Dazu müssen manuell vier Punkte im Bild bestimmt werden, die die Ecken eines Rechtecks sind. Diese Punkte sind durch die Stegspitzen sehr einfach manuell zu finden. Da alle Bilder aus derselben Perspektive aufgenommen werden, muss dies nur einmal geschehen und kann danach auf alle Bilder übertragen werden. Beim gerichteten Bild sind sowohl die Abstände zwischen zwei Stegen als auch die Abstände zwischen zwei Spitzen bei verschiedenen Stegen nahezu konstant.



**Abbildung 2.21** Ein Beispiel einer gerichteten NIR-Dunkelfeldaufnahme von Auflagestegen einer LFM.

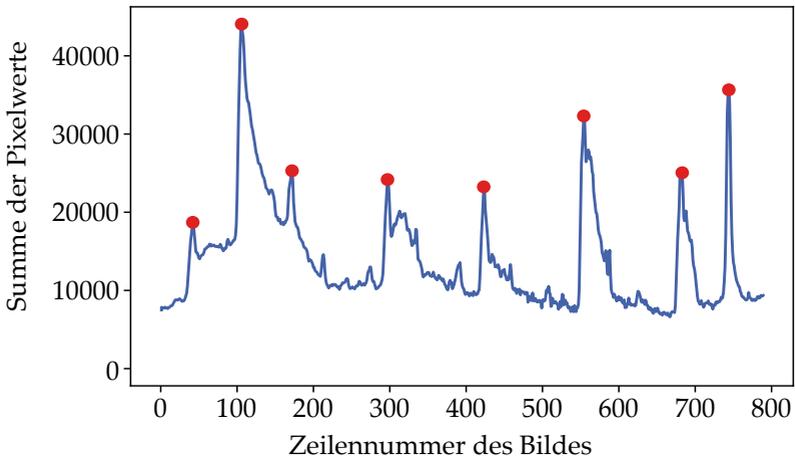
Ob ein Steg eingelegt worden ist, lässt sich leicht mittels Parallelprojektion bestimmen. Die Grauwerte werden dabei reihenweise (von links nach rechts in Abbildung 2.21) addiert und es entsteht ein diskreter Verlauf der Helligkeitswerte im Bild. Stege stellen in diesem Signal ein lokales Maximum dar. Die Maxima lassen sich mit einfachsten Methoden erkennen. So reicht es, Maxima durch den Vergleich mit den zwei direkten Nachbarn zu identifizieren. Aus dieser recht umfangreichen Liste werden dann alle Maxima entfernt, deren Differenz zwischen ihrem Wert und dem Wert des nächsten lokalen Minimums einen definierten Schwellenwert nicht erreicht. Zusätzlich werden so lange kleinere Maxima entfernt, bis alle Maxima eine gewisse Mindestdistanz zueinander haben. Die verbleibenden Maxima werden als Stege gewertet.

Aufgrund von Punktreflexionen (siehe Abbildung 2.22) kann es mit diesem Verfahren zu Fehldetektionen kommen. Um ihre Anzahl zu senken, kann außerdem für jede als Steg klassifizierte Reihe geprüft werden, wie stark die Grauwerte entlang der Reihe fluktuieren. Dazu wird im Abstand von wenigen Pixeln die Differenz der Grauwerte gebildet. Für die Implementierung wurde ein Abstand von 10 Pixeln gewählt, wobei leicht andere Werte zu den selben Ergebnissen führen. Wenn der Durchschnitt dieser Differenzen über einem definierten Schwellenwert liegt, handelt es sich um einen Steg. Wenn der Durchschnitt unter dem Schwellenwert liegt, handelt es sich um eine Fehlklassifikation, die aus der Liste der detektierten Stege gelöscht wird. In den in Kapitel 2.5.2 beschriebenen Aufnahmen dieser Arbeit ergaben sich zwischen den korrekten und fehlerhaften Detektionen zwei klare Cluster, weshalb ein Schwellenwert einfach bestimmt werden konnte. Als Beispiel ist das aus der Parallelprojektion resultierende Signal für das in Abbildung 2.21 gezeigte Beispiel in Abbildung 2.23 dargestellt, wobei die nach der Filterung von Punktreflexionen erkannten Stege rot markiert sind.



**Abbildung 2.22** Ein Beispiel von zwei der manchmal auftretenden Punktreflexionen, zwischen drei Stegen.

Aus dem extrahierten Steg können auch die einzelnen Spitzen detektiert werden, indem wieder eine Parallelprojektion durchgeführt wird. Dazu werden nur jeweils die 11 Zeilen des Bildes berücksichtigt, bei denen zuvor die mittlere Zeile als Steg erkannt wurde. Die Parallelprojektion wird diesmal in Richtung der Spalten durchgeführt, wodurch wie zuvor bei den Stegen auch ein diskretes Signal entsteht. Jede Stegspitze sollte in diesem Signal ein lokales Maximum darstellen. Wie bei der Stegerkennung



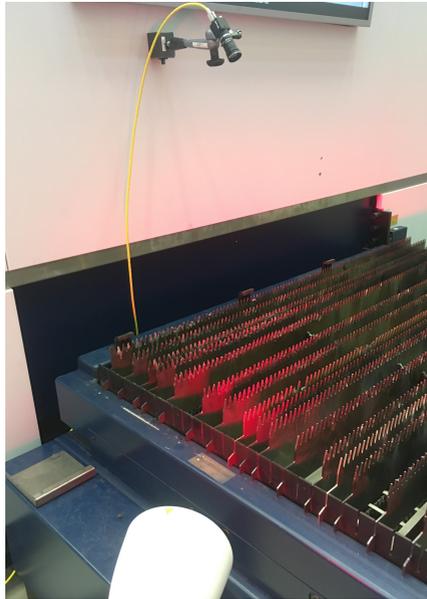
**Abbildung 2.23** Das aus der Parallelprojektion resultierende Signal für das Bild aus Abbildung 2.21. Die nach der Filterung von Punktreflexionen erkannten Stege sind rot markiert.

zuvor wird auch hier bei der Detektion von Maxima erstens ein minimaler Abstand zwischen zwei Maxima und zweitens eine minimale Differenz zum nächsten lokalen Minimum gefordert.

### 2.5.4 Umsetzung

Der Aufbau wurde wie in Kapitel 2.5.2 beschrieben an einer LFM der Serie TRUMPF TruLaser 3000 realisiert (siehe Abbildung 2.24). Die verwendete Kamera war eine FLIR Blackfly S mit Computar M0824-MPW2 Objektiv mit 8 mm Brennweite. Die eingesetzten Schmalbandfilter haben eine maximale Durchlässigkeit von über 90 % bei  $850 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$  bzw.  $940 \text{ nm} \pm 5 \text{ nm}$ . Als Beleuchtung wurde eine breitbandige Rotlicht-Infrarot-Lampe für den medizinischen Gebrauch genutzt. Die Lampen waren dabei so weit hinter und über den Stegen positioniert, dass der Einfallswinkel von hinten zwischen  $15^\circ$  und  $20^\circ$  und bei circa  $15^\circ$  von oben lag. Die Stegsteckplätze sind bei dieser Maschine 33,5 mm von einander entfernt. Der Abstand zwischen zwei Spitzen beträgt 14,8 mm.

Die Kamera wurde mit dem verbreiteten Schachbrettmusterverfahren intrinsisch kalibriert [82]. Vor Beginn der Aufnahmen wurde durch Aufnah-



**Abbildung 2.24** Der Versuchsaufbau am Palettenwechsler einer LFM. Die Beleuchtung ist ein breitbandiger Strahler, weshalb eine deutliche Rotfärbung zu sehen ist.

men mit dem Schmalbandfilter, aber ohne NIR-Beleuchtung sichergestellt, dass NIR-Licht nur in unwesentlichem Maße in den Räumen vorhanden ist. Dies hätte bedeutet, dass die Fremdlichunterdrückung nur zum Teil funktioniert und hätte entsprechend die Ergebnisse beeinflussen können. Bei Aufnahmen mit der NIR-Beleuchtung können die Stege klar erkannt werden (siehe Abbildung 2.21).

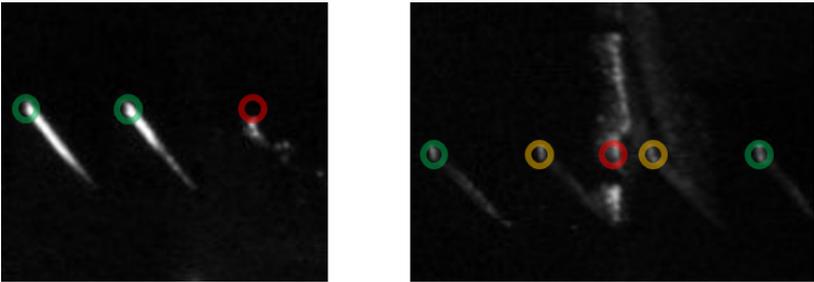
Um verschiedene Bedingungen abbilden zu können, wurden Stege mit verschiedenen Materialien, nämlich Baustahl, Edelstahl und Kupfer, getestet. Außerdem waren manche Stege neu, während andere nur gealtert waren, was einen Einfluss auf die Oberfläche der Stege hat, oder starke Verschlackung aufwiesen. Bei letzteren waren auch geschmolzene Spitzen vorhanden und einzelne Spitzen wurden absichtlich verbogen, um das vorgeschlagene Messsystem auch in der Detektion einzelner Spitzen testen zu können. Insgesamt wurden 20 unterschiedliche Bilder mit jeweils 12 Stegsteckpositionen im Sichtfeld der Kamera aufgenommen.

## 2.5.5 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse der Auswertungen wurden manuell überprüft. Von den insgesamt 240 aufgenommenen Stegsteckpositionen waren 150 belegt und 90 nicht belegt. Da ein leichtes Klassenungleichgewicht vorliegt, soll neben der Accuracy (siehe Formel 2.3) auch die *Balanced Accuracy* (siehe Formel 2.4) betrachtet werden.

$$\text{Balanced Accuracy} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\text{RP}}{\text{RP} + \text{FN}} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\text{RN}}{\text{FP} + \text{RN}} \quad (2.4)$$

Ohne Korrektur von Punktreflexionen werden alle 150 eingelegten Stege erkannt, zusätzlich aber 31 falsch positiv klassifiziert. Die Accuracy beträgt somit 87,1 %, die Balanced Accuracy 91,4 %. Bei Korrektur der Punktreflexionen gibt es keine Fehlklassifikationen.



**Abbildung 2.25** Zwei Ausschnitte mit teilweise korrekt (grün eingekreist) und teilweise falsch erkannten Spitzen. Links: Ein Beispiel einer falsch positiv erkannten Spitze (rot eingekreist). Rechts: Ein Beispiel für zwei falsch negativ (orange eingekreist) und eine falsch positiv erkannte Spitzen (rot eingekreist).

Wenn auf Basis dieser korrigierten Stegerkennung außerdem jede einzelne Stegspitze erkannt werden soll, kommt es, wie zu erwarten war, zu leicht schlechteren Ergebnissen. Da die Stege nicht symmetrisch sind, sind von einem Steg entweder 45 oder 46 Spitzen im Sichtfeld der Kamera. Insgesamt wurden 6870 mögliche Stegspitzen aufgenommen, davon waren 6616 tatsächlich vorhanden. Die erreichte Accuracy beträgt 98,7 % und die Balanced Accuracy 93,1 %. In diesem Fall ist die Balanced Accuracy aussagekräftiger, da das Klassenungleichgewicht recht stark ist.

Es treten ungefähr doppelt so viele falsch positive Erkennungen auf wie falsch negative. Die falsch positiven Erkennungen kommen sehr oft dadurch zustande, dass eine halb abgeschmolzene Spitze trotzdem sehr hell erscheint, teilweise auch, weil der Hintergrund sehr dunkel ist. Ein Beispiel dafür findet sich in Abbildung 2.25 links. Man könnte diese Fehldetektion mit den bestehenden Algorithmen lösen, wenn man die Höhe des zur Detektion der Spitzen benutzten Teilbildes verringern würde. Dadurch wird aber das aus der Parallelprojektion entstehende Signal verrauschter.

Falsch negative Erkennungen treten vor allem dann auf, wenn die Umgebung der Spitze verrauscht ist. So kam es teilweise durch einen der beiden Querträger der Palette (siehe auch Abbildung 2.15) zu Fehlerkennungen, da dieser dann beleuchtet wird, wenn mehrere Stege fehlen. Ein Beispiel ist in Abbildung 2.25 rechts zu sehen. Da einzelne Spitzen einen Mindestabstand haben müssen, werden die beiden Spitzen rechts und links des Querträgers nicht erkannt, weil dieser aufgrund der Helligkeit als Spitze gewertet wird.

# 3 Schachtelung für Laserschneidmaschinen

In vielen Bereichen der Produktion und Logistik entstehen Optimierungsprobleme, bei denen mehrere kleinere Gegenstände in einen größeren Gegenstand gepackt werden müssen. Beispiele sind die Beladung eines Lastkraftwagens mit Paketen unterschiedlicher Größe oder die Aufteilung eines großen Ausgangsmaterials in kleinere Stücke durch gerade Schnitte in der Papier- und Glasindustrie. Auch bei der Blechbearbeitung auf einer LFM müssen die zu schneidenden Teile möglichst effizient angeordnet werden.

Während bei diesen Problemen immer versucht wird, möglichst wenig Platz ungenutzt zu lassen, müssen alle kleineren Gegenstände in den größeren Gegenstand passen und dürfen sich nicht überlappen. Es handelt sich also um Optimierungsprobleme mit geometrischen Bedingungen. In der englischsprachigen Literatur werden diese Probleme oftmals als *Cutting- and Packing Problems* zusammengefasst, sollen im Folgenden aber als *Schachtelung* bezeichnet werden. Während die Probleme natürlich i. A. als  $n$ -dimensionale Probleme definiert werden können, soll in dieser Arbeit nur der 2D-Fall betrachtet werden, der in der Blechbearbeitung auftritt. Die kleineren Gegenstände werden deshalb als *Teile* bezeichnet, der größere Gegenstand als *Tafel* oder *Blech*.

## 3.1 Stand der Technik

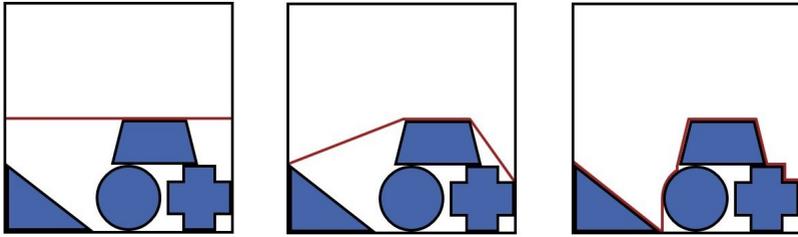
### 3.1.1 Schachtelung

Nach der in der Literatur gängigen Klassifizierung sind folgende Kriterien relevant, um Schachtelungsprobleme voneinander zu unterscheiden [81]:

- **Output-Maximierung oder Input-Minimierung:** Von Output-Maximierung wird gesprochen, wenn ein Problem mehr Teile hat als möglicherweise auf die Tafel passen. Es soll möglichst viel Fläche genutzt werden, wozu nicht nur die geometrische Anordnung der Teile bestimmt werden muss, sondern auch ausgewählt werden muss, welche Teile überhaupt berücksichtigt werden. Bei Input-Minimierungs-Problemen muss diese Auswahl nicht getroffen werden, denn die gegebene Teilemenge muss vollständig platziert werden. Dazu soll möglichst wenig Rohmaterial verwendet werden.
- **Beschränkungen des Rohmaterials:** Das Rohmaterial kann entweder in beiden Dimensionen eine definierte Ausdehnung haben oder wird in einer Dimension als unendlich lang angenommen. Dies ist eine Annäherung für Rohstoffe, die auf einer Rolle angeliefert werden.
- **Anzahl der Teiletypen:** Wie viele geometrisch verschiedene Teiletypen verarbeitet werden sollen, hat einen Einfluss auf die Komplexität des Problems. Wenn im Extremfall nur ein Teiletyp verwendet wird, sinkt der Aufwand für geometrische Berechnungen erheblich. Entsprechend werden *Cutting Stock Problems* mit wenigen Teiletypen und *Bin Packing Problems* mit vielen Teiletypen unterschieden.

In der Blechfertigung soll immer eine gegebene Teilemenge hergestellt werden, es handelt sich also immer um Input-Minimierungs-Probleme. Dabei kann es sowohl vorkommen, dass von jedem Teiletyp nur ein Teil zu platzieren ist, als auch, dass nur ein einziger Teiletyp benutzt wird.

Bleche werden oft als rechteckige Tafeln hergestellt, sind also in beiden Dimensionen beschränkt. Bei dieser Art Problem muss aber nicht nur das Layout festgelegt werden, sondern auch entschieden werden, wie viele Bleche benutzt werden müssen und welches Teil auf welchem Blech platziert wird. Diese Aspekte sollen für diese Arbeit aber keine Rolle spielen, weil sie sich durch die später vorgestellten Nebenbedingungen, die spezifisch für eine LFM sind, nicht ändern. Zur Vereinfachung der Darstellung soll deshalb angenommen werden, dass die Breite des Blechs definiert ist, die Länge hingegen unbeschränkt. Es wird die kürzeste Länge gesucht, in die eine gegebene Teilemenge geschachtelt werden kann. Diese Art Problem wird in der Literatur oft *Strip Packing* genannt [81].



**Abbildung 3.1** Verschiedene Bewertungskriterien. Links: Länge. Mitte: Konvexe Hülle. Rechts: Projektion. Eigene Darstellung nach [27].

Das Optimierungsproblem wird außerdem ungleich schwieriger, wenn jedes zu platzierende Teil in einem frei wählbaren Winkel platziert werden kann. Eine Zwischenstufe sind wenige, für jeden Teiletyp definierte Winkellagen. Oftmals sind dies in der Blechfertigung Drehungen um  $90^\circ$  von einer definierten Ausgangslage.

Eine wichtige Nebenbedingung für das Laserschneiden ist der minimale Abstand zwischen zwei Teilen. Dieser ist aus thermischen Gründen notwendig. Um die Darstellung der Probleme nicht unnötig komplizierter zu machen, wird im folgenden angenommen, dass der Minimalabstand zwischen einem Teil und dem Tafelrand und der Minimalabstand zwischen zwei Teilen identisch sind.

Eine nicht unerhebliche Rolle bei der Bewertung eines Schachtelungsalgorithmus fällt dem Bewertungskriterium zu, mit dem die Güte einer Schachtelung bestimmt wird. Welcher Teil des ungenutzten Materials dem Verschnitt oder dem wiederverwendbaren Material zugeordnet werden soll, ist keine triviale Frage und hängt maßgeblich vom Anwendungsfall ab. Dazu zählt die einfache Länge, die vor allem im Strip Packing als Kriterium genutzt wird (vgl. [16, 77]). Andere Möglichkeiten sind die konvexe Hülle oder eine Projektion [27], wie in Abbildung 3.1 dargestellt. Weitere mögliche Bewertungskriterien sind z. B. in [27] zusammengestellt.

### 3.1.1.1 Modellierung

Schachtelungsprobleme können auf unterschiedliche Art formalisiert werden. In allen Darstellungen wird dabei versucht, eine möglichst effiziente

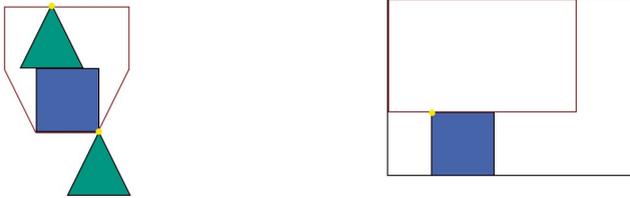
Anordnung der Teile zu finden und dabei drei Nebenbedingungen einzuhalten:

- Alle zu platzierenden Teile werden platziert.
- Für jedes mögliche Teilepaar gilt, dass sie sich nicht überlappen.
- Alle Teile liegen vollständig auf dem Ausgangsmaterial.

Ein großer Unterschied zwischen verschiedenen Modellierungsarten ergibt sich daraus, dass das Blech und die Teile entweder diskret [77] oder kontinuierlich [2] dargestellt werden können. Zur Darstellung des Modells in Kapitel 3.2 soll eine diskrete Formulierung verwendet werden, da diese leichter zu formalisieren und zu implementieren ist. Deshalb soll der Fokus dieses Kapitels auch auf diskreten Modellen liegen.

Das erste diskrete Modell, das eine exakte Lösung des Schachtelungsproblems mit Teilen, die eine beliebige Kontur haben, ermöglicht hat, wurde in [77] veröffentlicht. Hier wird der größere Gegenstand mit Punkten diskretisiert, die auf einem rechtwinkligen Raster entlang der beiden Dimensionen liegen. Daher stammt auch der Name *Dotted Board Model*. Die Teiletypen werden jeweils mit einem Referenzpunkt an der Außenkontur versehen. Dieser kann zu Beginn willkürlich gewählt werden, ändert sich aber nicht. Um sicherzustellen, dass die Teile vollständig innerhalb des größeren Gegenstands liegen und sich nicht überlappen, werden zwei wichtige geometrische Konzepte benutzt, nämlich das *Inner Fit Polygon* (IFP) und das *No Fit Polygon* (NFP) [5, 6]. Die Idee bei der Konstruktion dieser beiden Polygone ist ähnlich. Das IFP beschreibt die Fläche des größeren Gegenstands, in der sich der Referenzpunkt eines Teiletyps befinden muss, damit dieses Teil vollständig im größeren Gegenstand liegt (siehe Abbildung 3.2). Die Berechnung, ob ein Teil nach seiner Platzierung vollständig im größeren Gegenstand liegt, lässt sich mit dem IFP auf die Berechnung, ob der Referenzpunkt im IFP liegt, vereinfachen.

Das NFP ermöglicht diese vereinfachte Berechnung bei der Berechnung einer möglichen Überlappung von zwei Teiletypen. Dazu wird ein Teiletyp fest platziert und es wird das Polygon errechnet, das entsteht wenn der zweite Teiletyp in seiner fixen Rotationslage ohne Überlappung möglichst dicht am ersten Teiletyp um diesen herum geführt wird. Das NFP beschreibt also das Polygon, in dem sich der Referenzpunkt des zweiten

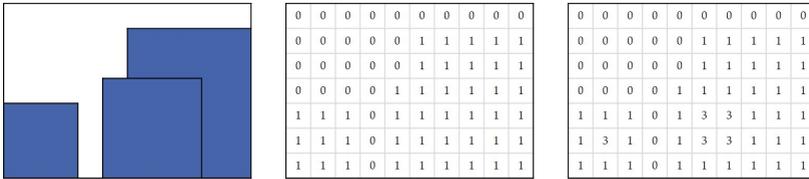


**Abbildung 3.2** Links: Das NFP (rot) eines an zwei verschiedenen Positionen dargestellten Dreiecks mit Referenzpunkt (gelb) oben, bei einem feststehenden Quadrat. Rechts: Das IFP (rot) eines Quadrats mit Referenzpunkt (gelb) oben links bei einer rechteckigen Tafel.

Teiletypen nicht befinden darf, damit sich die Teiletypen nicht überlappen (siehe Abbildung 3.2).

Das Modell benutzt dann binäre Variablen, um die Lage eines Teiletyps auf dem Blech zu codieren. Dabei gibt es für jeden Punkt auf dem Blech so viele binäre Variablen wie Teiletypen. Die binäre Variable an einem Punkt ist für einen Teiletyp dann 1, wenn ein platziertes Teil dieses Teiletyps dort seinen Referenzpunkt hat. Sonst ist sie 0. Die Nebenbedingungen können nun über diese binären Variablen definiert werden. So müssen mindestens so viele binäre Variablen eines Teiletyps 1 sein, wie Teile von diesem Teiletyp platziert werden sollen. Außerdem müssen die binären Variablen, die 1 sind, im IFP dieses Teiletyps liegen. Für jedes platzierte Teil muss gelten, dass der Referenzpunkt nicht in dem NFP eines anderen platzierten Teils liegt. Durch diese beiden Einschränkungen wird sichergestellt, dass die Teile vollständig auf der Tafel liegen und sich nicht überlappen.

Eine weitere Möglichkeit das Schachtelungsproblem während einer Berechnung darzustellen, ist die Rasterung des Blechs und der Teile in kleine Elemente, die den Pixeln eines Bildes sehr ähnlich sind [6]. Dabei kann entweder eine binäre oder eine ganzzahlige Darstellung sinnvoll genutzt werden. Bei der binären Darstellung werden ausschließlich 0 und 1 zur Codierung des Blechs genutzt. Oftmals wird durch 0 dabei als nicht von einem Teil belegte Fläche definiert und 1 entsprechend als belegte Fläche. Ein Nachteil dieser Darstellung ist, dass sich die Grenzen zwischen zwei Teilen nicht mehr eindeutig feststellen lassen, wenn sich diese berühren (siehe Abbildung 3.3). Abhilfe schafft hier eine ganzzahlige Darstellung, bei der also auch Zahlen außer 0 und 1 zulässig sind. So kann z. B. 1 benutzt werden, um die Außenkontur eines Teils zu codieren, während 3 das



**Abbildung 3.3** Ein Beispiel für die binäre Darstellung einer Schachtelung durch Rasterung. Links: Das Layout mit drei Teilen auf der Tafel. Mitte: Eine binäre Darstellung derselben Schachtelung. Rechts: Eine Darstellung derselben Schachtelung mit ganzen Zahlen, um den Rand eines Teils gesondert zu codieren.

innere des Teils darstellt (siehe Abbildung 3.3, rechts). Die Teile lassen sich nun eindeutig rekonstruieren.

Eine kontinuierliche, also geometrisch exakte Formulierung, kann durch trigonometrische Berechnungen erreicht werden. Es kann aus der Beschreibung der Teile als Polygone bestimmt werden, ob diese bei einer gegebenen Platzierung überlappen oder nur unvollständig auf dem Blech liegen [16]. Der große Vorteil dieser Modellierung ist, dass man sich nicht für ein Rasterungsmaß entscheiden muss und damit keinen Quantisierungsfehler einführt, der je nach Geometrie der Teile und des Blechs einen mehr oder minder großen Einfluss haben kann [16].

### 3.1.2 Exakte Lösung von Schachtelungsproblemen

Erste Veröffentlichungen, die exakte Lösungen für ein Schachtelungsproblem betrachtet haben, sind oftmals von starken Einschränkungen ausgegangen, wie z. B. nur einem einzigen Teiletyp [58, 67] oder ausschließlich rechteckigen Teilen [62]. Durch diese Einschränkungen werden die geometrischen Nebenbedingungen deutlich einfacher darstellbar.

Das erste veröffentlichte Modell, das Teile mit beliebiger Form zur exakten Lösung optimieren konnte, war das im vorherigen Abschnitt dargestellte *Dotted Board Model*. Die Modellierung erfolgt hier bewusst so, dass ein gemischt ganzzahliges Problem (MIP, für eng. *Mixed Integer Problem*) entsteht. Bei einem gemischt ganzzahligen Problem muss mindestens eine Variable ganzzahlig sein, während dies für mindestens eine weitere Variable nicht gilt. Für diese Probleme lassen sich durch iteratives Annähern exakte Lösungen finden, z. B. durch das *Branch and Bound* Verfahren [51].

Hierbei wird der Suchraum des Optimierungsproblems in jeder Iteration in kleinere Suchräume unterteilt (engl. *branching* genannt). Dieser Schritt alleine würde dazu führen, dass alle möglichen Lösungen im Sinne eines *brute force* Ansatzes berechnet werden. Stattdessen wird aber der noch zu durchsuchende Lösungsraum immer weiter eingeschränkt, sodass ganze Teilräume nicht durchsucht werden müssen, weil die optimale Lösung nicht in diesem Teilraum liegen kann (engl. *bounding* genannt). Dafür werden oft obere und untere Schranken benutzt. Beim Strip-Packing kann eine untere Schranke aus der Teilefläche hergeleitet werden. Die Länge des Strips kann nicht kleiner sein, als eine Schachtelung ohne Verschnitt wäre, denn das ginge nur mit Überlappung der Teile. Eine obere Schranke für das Strip-Packing lässt sich z. B. aus der Summe der längeren Dimension aller Teile berechnen. Dann würden alle Teile nacheinander und eben nicht nebeneinander liegen, was die schlechteste zulässige Schachtelung darstellt, die nicht offensichtlich verbessert werden kann.

Auch andere Modellierungsansätze, ob als Rasterung oder exakte Geometrie, nutzen die Formulierung als MIP, um eine exakte Lösung zu erreichen [2, 15, 16]. Die dabei eingesetzten exakten Algorithmen wurden auf Problemgrößen mit bis zu 16 Teilen angewandt und benötigen dafür eine Rechenzeit zwischen ungefähr 2,5 und 5,5 Stunden. Probleme mit 6 Teilen brauchen im Vergleich deutlich weniger, nämlich zwischen 5 und 30 Sekunden.

Die mit der Teileanzahl stark ansteigenden Rechenzeiten sind nicht verwunderlich, da Schachtelungsprobleme NP-vollständig sind [26]. Die Zeit, die benötigt wird, um eine exakte Lösung zu berechnen, steigt also im schlimmsten Fall vermutlich stärker als polynomiell mit der Größe der Eingangsvariablen, hier also vor allem der Anzahl der Teile. Deswegen wurde in der Vergangenheit neben der Beschreibung exakter Lösungsalgorithmen vor allem versucht, schnelle Heuristiken mit guter Lösungsqualität zu finden. Heuristiken sind approximierende Verfahren, die nicht unbedingt die optimale Lösung finden.

### 3.1.3 Heuristische Lösung von Schachtelungsproblemen

Für die in der Industrie auftretenden Schachtelungsprobleme mit bis zu mehreren Tausend Teilen sind exakte Lösungsverfahren zu langsam. Des-

wegen wird oftmals auf verschiedene Heuristiken zurückgegriffen und Ergebnisse von Hand kontrolliert und ggf. korrigiert.

Die erste publizierte heuristische Lösung für das Schachtelungsproblem ist die sogenannte *Bottom-Left*-Heuristik [3]. Dabei werden Teile in einer gegebenen Reihenfolge nacheinander platziert. Es wird eine Haupt- und eine Nebenrichtung definiert, oftmals ist „nach unten“ (engl. *bottom*) die Hauptrichtung und „nach links“ (engl. *left*) die Nebenrichtung, woher der Name des Verfahrens stammt. Die Position eines Teiles wird durch Verschiebe-Operationen bestimmt. Das Teil wird zunächst in der Ecke platziert, die der Haupt- und Nebenrichtung gegenüber liegt. Von dort aus wird das Teil in jedem Schritt so weit wie möglich in Hauptrichtung verschoben. Wenn dies nicht möglich ist, wird das Teil so weit wie möglich in Nebenrichtung verschoben. Wenn kein Verschieben des Teils möglich ist, wird mit dem nächsten Teil fortgefahren.

Die *Bottom-Left*-Heuristik stellt eine geometrische Anordnungsvorschrift für eine gegebene Reihenfolge der Teile dar. Zur Optimierung der Schachtelung muss nur die Reihenfolge der Teile optimiert werden. Dies ist mit Meta-Heuristischen Ansätzen möglich, wie z. B. einem evolutionären Algorithmus [25].

Evolutionäre Algorithmen gehören zu den stochastischen Optimierungsverfahren. Der Name stammt aus der schemenhaften Anlehnung an die Grundprinzipien der Evolutionslehre. Es werden in vielen Publikationen deshalb auch die Begriffe der Evolutionslehre verwendet, um Verfahren der Optimierungstheorie zu beschreiben [74]. Um Unklarheiten zu vermeiden, wird im Folgenden so weit wie möglich darauf verzichtet. Bei einem evolutionären Algorithmus gibt es eine Menge an möglichen Lösungen, die zu einem Zeitpunkt untersucht wird. Die Anzahl der Lösungen pro Iteration ist vorab definiert. Die initialen Lösungen werden oftmals zufällig generiert. Je nach Problemgröße und Vorwissen können auch mit anderen Verfahren initiale Lösungen generiert werden. Bei der Schachtelung von rechteckigen Teilen bietet es sich beispielsweise an, die Teile nach der Größe zu sortieren [48]. Die Lösungen werden dann anhand einer Bewertungsfunktion bewertet und können so in eine eindeutige Reihenfolge gebracht werden.

Der Übergang von einer Iteration zur nächsten passiert in zwei Stufen [22]. Erstens werden bestehende Lösungen durch ein Selektionsverfahren

ausgewählt, damit aus diesen Lösungen neue Lösungen generiert werden können. Als Selektionsverfahren kann eine zur Bewertung proportionale Selektion gewählt werden. Hierbei ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Lösung gewählt wird, von der absoluten Bewertung dieser Lösung im Verhältnis zur Summe aller absoluten Bewertungen abhängig. Der große Nachteil daran ist, dass sich gute Lösungen sehr schnell vollständig durchsetzen und dadurch nur ein kleiner Teil des potentiellen Suchraums auf gute Lösungen geprüft wird. Ein anderes Selektionsverfahren ist die *Tournament-Selektion*. Hierbei wird zuerst eine Teilgruppe aus der Menge der Lösungen zufällig ausgewählt. Diese Gruppe an Lösungen wird nach ihrer jeweiligen Bewertung sortiert und die beste Lösung ausgewählt. Da alle Lösungen mit der gleichen Wahrscheinlichkeit in die Teilgruppe kommen, setzen sich einzelne Lösungen nicht ganz so schnell durch [22].

Neue Lösungen werden dann aus der oder den gewählten bestehenden Lösungen durch verschiedene Veränderungen generiert. Die drei verbreitetsten sind Elitismus, Mutation und Kreuzung [22]. Elitismus bedeutet dabei, dass ein vorher spezifizierter Anteil der besten Lösungen in die nächste Iteration übernommen wird. Dies führt dazu, dass einmal gefundene gute Lösungen nicht wieder verworfen werden. Bei der Mutation wird eine Lösung in sich selbst stochastisch verändert. Für die Reihenfolge von Teilen bei der Schachtelung bedeutet das, dass eine bestimmte Anzahl an Teilen, die in der Reihenfolge benachbart sind, aus dieser Stelle der Reihenfolge ausgeschnitten und an einer zufälligen anderen Stelle der Reihenfolge eingefügt werden. Bei der Kreuzung werden zwei Lösungen kombiniert. Dafür wird die erste Lösung bis zu einer gewissen Stelle übernommen und der Rest der neuen Lösung stammt aus der zweiten originalen Lösung. Bei den Reihenfolgen von Teilen für die Schachtelung wird also eine Lösung bis zu einer zufälligen Stelle übernommen und danach die Teile einer zweiten Lösung eingefügt. Hierbei kann es zu zwei Fehlern kommen, nämlich, dass Teile nicht mehr vorkommen oder doppelt vorhanden sind. Die neu entstandene Lösung muss um diesen Effekt durch Einfügen und Löschen von Teilen bereinigt werden. Dabei muss definiert werden, welches Teil einer möglichen Dopplung gelöscht werden soll. Ebenso braucht es eine Regel, wie nicht mehr vorhandene Teile eingefügt werden sollen. [25]. Der evolutionäre Algorithmus läuft dann, bis ein definiertes Abbruchkriterium erreicht wird. Am häufigsten ist dies eine Anzahl an Iterationen bzw. eine

Zeitschranke, stattdessen oder zusätzlich kann aber auch eine bestimmte Lösungsqualität angegeben werden.

Bei den publizierten Ergebnissen wird schnell klar, dass der hier skizzierte Algorithmus bestehend aus einem evolutionären Optimierer und einer *Bottom-Left*-Anordnungsvorschrift gut geeignet ist, um rechteckige Teile zu schachteln [48]. Bei beliebigen Konturen hingegen können schwerwiegende Fehler auftreten, insbesondere wenn ein Bereich der Tafel nicht mehr erreicht werden kann, da ein Teil den Zugang zu diesem Bereich blockiert. Abhilfe kann hier eine Erweiterung der *Bottom-Left*-Regel schaffen, die nicht erreichbare Bereiche der Tafel nach jeder Platzierung registriert und Teile in dem kleinsten Bereich der Tafel platziert, in den dieses Teil passt [11]. Die entstandenen Lücken werden also zuerst gefüllt, weshalb das Verfahren als *Bottom-Left-Fill* bekannt ist.

Andere Meta-Heuristiken, wie z. B. *Simulated Annealing* [36] oder *Particle-Swarm* Algorithmen [71] sind ebenfalls auf das Schachtelungsproblem angewandt worden. Ebenso können verschiedene Anordnungsvorschriften, wie z. B. Methoden, die auf das NFP zurückgreifen, benutzt werden [5]. Diese weiteren Ansätze sollen hier aber nicht genauer betrachtet werden, da sie für die weitere Abhandlung nicht relevant sind.

#### 3.1.4 Schachtelung mit Nebenbedingungen aus dem Produktionsprozess

In der wissenschaftlichen Literatur existiert keine Abhandlung über die beschriebene Problematik der Veränderung der Schachtelung zur Steigerung der Prozesssicherheit oder Verringerung des Verschleißes beim Laserschneiden. Im Patent [40] hingegen wird genau diese Problematik behandelt. Die dort präsentierte, recht einfache Lösung besteht darin, den Abstand zwischen zwei Teilen von vorne herein so groß zu wählen, dass ein Rand entsteht, in dem im Nachhinein jedes Teil bestmöglich verschoben werden kann. Dieser Ansatz optimiert also nicht den Verschnitt, sondern ausschließlich die Prozesssicherheit und nimmt einen deutlich gestiegenen Verschnitt in Kauf, unabhängig davon, ob eine Verschiebung für die konkreten Teile überhaupt notwendig gewesen wäre. Durch den hohen Anteil der Materialkosten an den Teilekosten ist dieses Verfahren in der Praxis unwirtschaftlich.

Anders als bei der Schachtelung gibt es zur Planung der Verfahwege des Schneidkopfs einer LFM mit Berücksichtigung des Verkippverhaltens von geschnittenen Teilen wissenschaftliche Literatur [17]. Bei Teilen, die verkippfen könnten, wird dann entweder der Schneidkopf hochgezogen oder das Teil vollständig umfahren. Es bleibt allerdings offen, wie sich das Verkippfen der Teile genau berechnen lässt und wie die Auflagestege konkret dazu beitragen. Die Schachtelung wird als gegebener Input der Planung der Verfahwege angesehen und wird deshalb nicht verändert.

Es wurde schon Anfang der 1990er Jahre erwähnt, dass eine möglichst enge Schachtelung der Teile nicht zwangsweise zu guten Ergebnissen in industriellen Prozessen führt [80]. Die weiteren Faktoren, die dabei berücksichtigt wurden, waren eine mögliche Überproduktion bei regelmäßigen Aufträgen, um weniger Verschnitt zu erzeugen, und die Lagerkosten für die überschüssigen Teile.

Eine weitere bei vielen Fertigungsverfahren zu beachtende Nebenbedingung ist die Anzahl der Rüstvorgänge, die zwischen zwei verschiedenen Produktionsaufträgen nötig werden und die Produktionszeiten entscheidend verlängern können. Es werden also möglichst viele gleiche Schachtelungen gesucht. In [63] wird dies grundsätzlich betrachtet, für die Anwendungsfälle einer Stanzmaschine auch in [38] und die Papierindustrie in [29, 47]. Auf Grund der Prozessunsicherheiten bei der LFM wird in der Praxis manchmal auch nach möglichst vielen gleichen Schachtelungen gesucht. Diese werden dann von Hand im Hinblick auf die Prozesssicherheit optimiert.

Eine andere Nebenbedingung aus dem Produktionsprozess, deren Einfluss auf die Schachtelung untersucht wurde, ist die Walzrichtung des Blechs. In [38] wird ein Verfahren vorgestellt, bei dem jedes Teil eines Teiletyps in derselben, vordefinierten Rotation relativ zur Walzrichtung ausgerichtet wird. Die Rotation der Teile ist also vorgegeben und kann nicht durch den Schachtelungsalgorithmus verändert werden.

Die hier erwähnten Arbeiten sind sich in der Hinsicht ähnlich, dass sie nie den Schachtelungsalgorithmus selbst verändern, sondern auf bestehende Algorithmen zurückgreifen. Die im nächsten Kapitel vorgestellten Verfahren unterscheiden sich in diesem wichtigen Punkt vom Stand der Technik.

## 3.2 Schachtelung unter Berücksichtigung der Auflagepunkte

Um die in Kapitel 1.1 angesprochenen Prozesssicherheitsprobleme zu lösen, wird nun versucht, die Auswirkungen der Auflagestege auf den Produktionsprozess schon während der Schachtelung zu berücksichtigen. Dazu wird das Problem zunächst formal modelliert. Anschließend werden Lösungen durch zwei Heuristiken betrachtet. Diese beachten zusätzlich zum offensichtlichen Ziel einer möglichst hohen Schachtelungsdichte weitere Nebenbedingungen, nämlich die Stabilität bzw. das Verkippen von Teilen in Abhängigkeit vom Freischnittpunkt und die Stegbeschädigung.

Teile der folgenden Ausführungen, insbesondere zur formalen Problembeschreibung und zur Lösung durch eine Konstruktionsheuristik, sind bereits in [87] veröffentlicht worden.

### 3.2.1 Formale Problembeschreibung und exakte Lösung

Es lässt sich in Anlehnung an das *Dotted Board Model* ein Modell zur Schachtelung unter Berücksichtigung der Auflagepunkte definieren. Der wichtigste Unterschied besteht dabei in der Wahl der Zielfunktion, da jetzt nicht mehr nur die Packungsdichte ( $z_{pd}$ ) optimiert wird. Es sollen zwei zusätzliche Faktoren berücksichtigt werden, nämlich wie viele Teile kippen ( $z_k$ ) und wie stark die Auflagestege beschädigt werden ( $z_b$ ). Um den durch die verschiedenen Zielvariablen ausgelösten Zielkonflikt entscheiden zu können, sind Gewichte  $w_{pd}$ ,  $w_k$  und  $w_b$  für jede Variable nötig, sodass eine additive Zielfunktion entsteht (Gleichung 3.1). Eine weitere Möglichkeit wäre hier die hierarchische Optimierung, die für die verschiedenen Zielvariablen eine klare Hierarchie festlegt und weniger wichtige Zielvariablen erst dann optimiert, wenn die wichtigeren Variablen nicht mehr verbessert werden können. Diese Möglichkeit erscheint aber nicht sinnvoll für die vorliegende Anwendung, da der beste Kompromiss unter den Zielvariablen gefunden werden soll.

Für diese Modellierung soll das Blech als Matrix dargestellt werden, wobei die Matrixelemente analog zum Pixel eines Bildes zu sehen sind. Jedes Element der Matrix lässt sich also über die diskreten Koordinaten  $(u, v)$  eindeutig adressieren. Die verwendeten Teiletypen  $t_i$  sind ebenfalls

als Matrix ihres einhüllenden Rechtecks dargestellt, wobei  $i$  die jeweilige Rotation des Teils angibt. Die Form des Teils wird dabei durch binäre Einträge dargestellt. Die Teiletypen werden durch einen Referenzpunkt  $\iota = (u, v)$  auf dem Blech platziert. Dazu wird  $t_i$  auf alle entsprechenden  $(u, v)$  addiert. Wenn dadurch ein Matrixelement  $(u, v)$  größer als 1 werden sollte, stellt dies eine unzulässige Überlappung von Teilen dar. Der Referenzpunkt eines Teiletyps darf nur so gewählt werden, dass das Teil auch vollständig auf dem Blech liegt. Zur Überprüfung wird das IFP herangezogen, wobei  $\rho(t_i)$  die Menge aller Elemente im IFP für einen Teiletyp in einer Rotationslage ist. Die zu platzierende Anzahl an Teilen pro Teiletyp ist durch  $q_t$  gegeben.

Die Auflagestege werden durch eine Matrix  $\Psi$  dargestellt, deren Einträge nur die Werte 0, 1 oder 2 annehmen können. Die Einträge stehen respektive für leeren Raum unter dem Blech, einen Steg aber keine Spitze oder eine Stegspitze. Die Außenkonturen der Teile und damit die Schneidkonturen sind durch die Matrix  $\Theta$  gegeben, die für eine Schneidkontur 1 ist und für alle anderen Einträge 0. Ein Element dieser Matrizen wird durch einen entsprechenden Subskript notiert, z. B.  $\Theta_{(u,v)}$ . Das Verkippen eines Teils ist von seiner Rotation, seinem Referenzpunkt und den Auflagestegen abhängig. Dies wird als  $\Phi_{\iota_t}(\Psi)$  notiert, wobei die Einträge 0, 1 und 2 hier respektive für ein stabiles oder fallendes, ein unsicheres und ein kippendes Teil stehen.

Die notwendigen Nebenbedingungen des Schachtelungsproblems sind im Grundsatz schon angesprochen worden. Es muss sichergestellt werden, dass alle Teile platziert werden. Dies wird durch Gleichung 3.5 sichergestellt. Außerdem dürfen sich Teile nicht überlappen, was durch Gleichung 3.6 gegeben ist. Damit alle Teile auch vollständig auf dem Blech liegen, muss Gleichung 3.7 erfüllt sein.

In dieser Formulierung des Problems muss außerdem sichergestellt werden, dass die Zielvariablen den korrekten Wert zugewiesen bekommen. Dabei wird nur eine untere Schranke angegeben. Für  $z_{pd}$  bedeutet dies, dass die größte Spalte  $v$  ausgewählt wird, in der ein Eintrag größer als 1 ist (Gleichung 3.2). Bei der Stegbeschädigung wird  $z_b$  als Summe über alle Produkte der Außenkonturen und Auflagestege definiert (Gleichung 3.3). Das Verkippen  $z_k$  wird ebenfalls als Summe über die Stabilität aller Teile dargestellt (Gleichung 3.4).

Das Optimierungsproblem als Ganzes ist in den Gleichungen 3.1 bis 3.10 dargestellt. Die letzten drei Gleichungen definieren dabei ausschließlich den Wertebereich der Variablen.

$$\min \quad z_{pd} \cdot w_{pd} + z_k \cdot w_k + z_b \cdot w_b \quad (3.1)$$

$$\text{u. d. N.} \quad \max\{v \mid \sum_u (u, v) \geq 1\} \leq z_{pd} \quad (3.2)$$

$$\sum_{(u,v)} \Psi_{(u,v)} \cdot \Theta_{(u,v)} \leq z_b \quad (3.3)$$

$$\sum_{\iota_t} \Phi_{\iota_t}(\Psi) \leq z_k \quad \forall \iota, t \quad (3.4)$$

$$\sum_{(u,v)} \iota_t^{(u,v)} \geq q_t \quad \forall t \quad (3.5)$$

$$\sum_t t(\iota)_{(u,v)} \leq 1 \quad \forall (u, v) \quad (3.6)$$

$$\iota(t_i) \in \rho(t_i) \quad \forall \iota \quad (3.7)$$

$$z_{pd}, z_k, z_b \in \mathbb{N} \quad (3.8)$$

$$\Phi_{(u,v)}, \psi_{(u,v)} \in \{0, 1, 2\} \quad (3.9)$$

$$\Theta_{(u,v)} \in \{0, 1\} \quad (3.10)$$

Die in Kapitel 3.1.2 eingeführte Vorgehensweise zur exakten Lösung mittels der *Branch and Bound* Methode ist auf das oben aufgestellte MIP mit den Nebenbedingungen immer noch anwendbar. Eine interessante Frage ist, ob das Problem grundsätzlich durch die neuen Nebenbedingungen schneller oder langsamer zu berechnen ist. Dies ist zum Einen davon abhängig, ob die zusätzlichen Nebenbedingungen und unter Umständen notwendigen Zielfunktionsvariablen den Suchraum des Problems vergrößert oder verkleinert haben. Zum anderen haben auch die Struktur des Suchraums und entsprechend angepasste Suchstrategien einen großen Einfluss. Für manche Probleme aus der industriellen Anwendung führen Nebenbedingungen zu einem kleineren Suchraum. Dies ist z. B. der Fall, wenn beim Schachteln die Rotationsmöglichkeiten von Teilen auf eine bestimmte Rotation fixiert werden. Gleiche Reihenfolgen von Teilen verlieren dann komplett die Möglichkeit von verschiedenen Rotationen und stellen immer die gleiche Lösung dar. Der Suchraum ist deshalb erheblich kleiner.

Die Erweiterung um die Zielvariablen  $z_k$  und  $z_b$  hat den Suchraum offensichtlich nicht verkleinert, da keine der möglichen Lösungen des einfachen Schachtelungsproblems entfallen. Der Suchraum ist durch die zusätzlichen Zielvariablen aber auch nicht zwangsweise größer geworden, da die Lösungsmöglichkeiten immer noch dieselben Schachtelungen sind, auch wenn sie jetzt anders bewertet werden. Die Rechenzeit nimmt allerdings durch die zusätzlichen Rechnungen in der Bewertung auf jeden Fall zu.

Exakte Lösungen sind schon ohne die Berücksichtigung von Nebenbedingungen aus dem Produktionsprozess für die industrielle Anwendung uninteressant, da bei Teilen mit beliebiger Kontur und Stückzahlen größer als ungefähr 20 die Berechnungen zu lange dauern. Deshalb werden Heuristiken benutzt, die schnell Lösungen mit relativ hoher Qualität ausgeben sollen. Im Folgenden werden zwei Heuristiken vorgestellt, eine Konstruktionsheuristik und eine Verbesserungsheuristik. Eine Konstruktionsheuristik errechnet eine zulässige Lösung direkt aus den Eingaben. Eine Verbesserungsheuristik benutzt eine bestehende zulässige Lösung und verbessert diese durch eine Veränderung der Variablen.

### 3.2.2 Lösung durch eine Konstruktionsheuristik

Eine Konstruktionsheuristik zur Lösung des vorgestellten Problems muss nicht nur eine gute Schachtelung der Teile erstellen können, sondern vor allem auch die prozessrelevanten Nebenbedingungen berücksichtigen. Wie schon in der Modellierung gezeigt, sollen das Verkippen von Teilen und die Stegbeschädigung zusätzlich in die Optimierung einfließen.

Die Optimierung der Schachtelung wird durch einen evolutionären Algorithmus durchgeführt. Eine Lösung besteht dabei aus einer Permutation der Teile. Die Teile sind in der gegebenen Reihenfolge auf der Tafel zu platzieren, wobei die Bottom-Left-Platzierungsregel benutzt wird. Die Fitness wird nach Gleichung 3.1 berechnet. Zur Darstellung des Problems werden die Teile und das Blech als diskrete Elemente aufgefasst, genau wie in der Modellierung in Kapitel 3.2.1. Für jedes Teil, das platziert werden soll, wird dann das Verkippsverhalten und die Stegbeschädigung berechnet. Dafür müssen die Position der Stege und die Position des Blechs relativ zu den Stegen bekannt sein. In der Praxis kann eine der in Kapitel 2 vorgestellten Methoden benutzt werden, um diese Informationen zu erlangen. Die

Verkippberechnung hängt von der Geometrie des Teils, insbesondere vom Schwerpunkt, den Auflagepunkten, dem Freischnittpunkt, der Gaskraft und dem Gewicht des Teils ab. Vereinfacht gesagt ist ein Teil dann stabil, wenn es ohne Gasdruck auf den Auflagestegen stabil liegen kann und das über die Gaskraft wirkende Drehmoment beim Freischneiden des Teils nicht größer ist als das durch die Schwerkraft eingebrachte Drehmoment. Der genaue Berechnungsablauf wird in Anhang A dargestellt. Ähnlich wie in der Modellierung in Kapitel 3.2.1 wird die Stegbeschädigung aus der Schnittlänge über den Auflagestegen berechnet. Dabei ist aus Versuchen bekannt, dass die Beschädigung schlimmer ist, wenn über einer Stegspitze geschnitten wird, im Vergleich zu einer Flanke oder Senke. Entsprechend gibt es einen Gewichtungsfaktor, der dafür sorgt, dass Stegspitzen im Vergleich zum sonstigen Steg doppelt gewichtet werden.

Wenn das Schachtelungsverfahren ansonsten unverändert beendet werden würde, würde das bereits helfen, das zu Grunde liegende Problem zu lösen. Die grundsätzliche Anordnung der Teile auf dem Blech erfolgt zwar ausschließlich nach dem Bottom-Left-Prinzip, aber bei zwei in der Schachtelungsdichte gleichen oder zumindest ähnlich guten Schachtelungen wird jetzt diejenige gewählt, die gegeben die drei Gewichtungsfaktoren das beste Ergebnis liefert. Das hier vorgestellte Verfahren geht aber noch einen Schritt weiter.

## 3.2.3 Lokales Verschiebverfahren und Berechnungen

### 3.2.3.1 Lokales Verschiebverfahren

Wenn ein Teil seine vom Bottom-Left-Prinzip festgelegte Position erreicht hat, wird geprüft, ob durch eine Verschiebung des Teils eine Verbesserung des Verkippverhaltens oder der Stegbeschädigung erreicht werden könnte. Damit dies nicht der Fall ist, muss das Teil stabil gelagert sein und es darf nur wenige Millimeter Schnitt über den Auflagestegen geben. Hier keinen Schnitt über den Auflagestegen zu fordern, würde nur dazu führen, dass die meisten Teile in fast jeder Lage eine Verbesserungsmöglichkeit aufweisen. Abhängig von der Größe des Teils und dem Gewichtungsfaktor für die Stegbeschädigung wird deshalb ein geringer Schnitt über den Auflagestegen zugelassen.

Wenn eine Verbesserung möglich wäre, wird zuerst geprüft, in welchem Raum der Referenzpunkt unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Gewichtungsfaktoren verschoben werden sollte. Dadurch soll verhindert werden, dass eine Verschiebung geprüft wird, bei der definitiv keine Verbesserung erzielt werden kann. Dies ist der Fall, wenn die Schachtelungsdichte so weit sinkt, dass die anderen beiden Faktoren definitiv keine ausreichend große Verbesserung erreichen können. Entscheidend ist an dieser Stelle die Definition des Verschnitts, der durch die Verschiebung entsteht, denn den tatsächlich am Ende der Schachtelung entstehenden Verschnitt kann man zu diesem Zeitpunkt in der Berechnung nicht direkt vorhersagen. Die Schachtelung vollständig weiter zu berechnen, bis dieser Effekt bekannt ist, lässt die Berechnungskomplexität sehr stark steigen, denn für jedes zu platzierende Teil müssten Hunderte Schachtelungen berechnet werden. Ein solches Vorgehen erscheint also nicht sinnvoll.

Stattdessen soll der zusätzliche Verschnitt  $z_v$  lokal am Teil abgeschätzt werden, ohne mögliche Abhängigkeiten mit den danach platzierten Teilen zu berücksichtigen. Dazu wird die Verschiebung in der jeweiligen Dimension  $\delta_x, \delta_y$  und die Länge des einhüllenden Rechtecks  $b_x, b_y$  in dieser Dimension genutzt. Bei der Verschiebung in beiden Dimensionen muss außerdem die Fläche, die sich aus der Multiplikation der beiden Verschiebungen ergibt, berücksichtigt werden. Zusammenfassend lässt sich also schreiben:

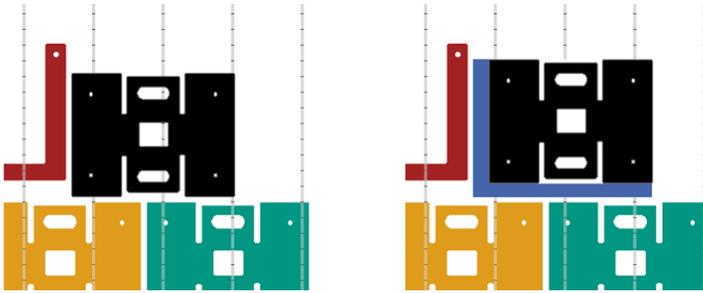
$$z_\delta = \delta_x \cdot b_x + \delta_y \cdot b_y + \delta_x \cdot \delta_y.$$

Ein Beispiel für die Fläche  $z_v$  ist in Abbildung 3.4 gezeigt.

Der mögliche Suchraum besteht aus einem rechtwinkligen Dreieck, in dem das Teil entgegen der Bottom-Left-Richtungen verschoben wird. Die maximale Verschiebung in mm kann in der jeweiligen Dimension durch:

$$\delta_{\max} = (\sigma_k \cdot w_k + \sigma_b \cdot w_b) \cdot \frac{u_{\max}}{w_{pd} \cdot l}$$

bestimmt werden, wobei  $\sigma_k$  bzw.  $\sigma_b$  die maximale Verbesserung bei der Stabilität bzw. der Stegbeschädigung (nach dem Optimierungsmodell in Kapitel 3.2.1 zwischen 0 und 2 definiert),  $l$  die Länge des Teils in der jeweils anderen Dimension in mm und  $u_{\max}$  die Fläche einer Spalte der Blechmatrix in  $\text{mm}^2$  ist. Damit die Verschiebung möglichst gering ausfällt, werden die möglichen Platzierungen anhand der Euklidischen Distanz sortiert und



**Abbildung 3.4** Ein Beispiel für den bei der Verschiebung eines Teils veranschlagten Verschnitt. Links: Die Position des schwarzen Teils bei Anwendung der Bottom-Left-Regel. Rechts: Das schwarze Teil in einer verschobenen Position, der Verschnitt ist blau markiert.

nacheinander geprüft. Sollte es dazu kommen, dass bei einer Position keine weitere Verbesserung bei der Stabilität des Teils und der Stegbeschädigung möglich ist, wird diese Position gewählt und das Verfahren bricht ab. Jeder weitere Punkt würde nur zu einer größeren, ungewollten Verschiebung führen. Sonst werden alle Punkte im Suchraum bewertet und die beste gefundene Position gewählt. Dabei muss jeweils auch die Überlappung mit anderen Teilen geprüft werden, da die Verschiebungen insbesondere in  $y$ -Richtung zu Überlappungen mit anderen Teilen führen können.

Für die Stabilität eines Teils ist es sehr wichtig, an welcher Stelle der Kontur das Teil freigeschnitten wird. Zum Zeitpunkt des Freischnitts liegt der volle Gasdruck an und das Teil kann zum ersten Mal verkippen. Wenn der Freischnittspunkt ungeschickt liegt, ist der Hebelarm der Gaskraft lang und ein Verkippen des Teils wahrscheinlicher. Insbesondere kleinere Teile aus dünnen Materialien, die mit einem hohen Gasdruck geschnitten werden, sind gefährdet zu verkippen.

Bei einer klassischen Programmierung der LFM können die Freischnittpunkte nicht so gewählt werden, dass die Teile möglichst wenig verkippen, da die Position und der Zustand der Auflagestege nicht bekannt sind. Dies wird bei den Berechnungen durch zufällige Freischnittpunkte modelliert. Aus allen Punkten der Außenkontur eines Teiles wird dabei ein Punkt zufällig ausgewählt, wobei alle Punkte gleich wahrscheinlich sind.

Im Gegensatz dazu stehen die bewusst unter Berücksichtigung des Verkippens und der Stegbeschädigung gewählten Freischnittpunkte, die im

Folgenden als beste Freischnittpunkte bezeichnet werden. Sie werden dadurch berechnet, dass alle Punkte auf der Kontur geprüft werden. Sobald ein Freischnittpunkt gefunden ist, der keine Stegbeschädigung verursacht und bei dem das Teil stabil liegen bleibt, wird dieser Punkt gewählt und das Verfahren bricht ab. Falls kein solcher Punkt gefunden werden kann, wird der beste bekannte Punkt gewählt.

Einen Sonderfall stellen Teile dar, die so klein sind, dass es keine stabile Position geben kann. Sie können daran erkannt werden, dass die längere Seite des umgebenden Rechtecks des Teils kleiner ist als der Abstand zwischen zwei Stegen. Wenn das Teil in der ursprünglich durch das Bottom-Left-Verfahren bestimmten Position einen Steg unter sich hat, wird es als kippend angesehen. In diesem Fall muss geprüft werden, wie weit das Teil verschoben werden muss, damit das Teil durch die Stege fallen kann. Erst wenn kein Auflagesteg, also nicht nur keine Spitze, unter dem Teil ist, ist dies der Fall. Abhängig von der Distanz, die das Teil verschoben werden müsste, und den Gewichtungsfaktoren kann bestimmt werden, welche Option zur Platzierung des Teils die bessere ist. Die Definition des Verschnitts ist dabei gleich zum vorhergehenden Absatz über Teile, die stabil platziert werden sollen.

### 3.2.3.2 Berechnungen

Die Teilemenge für die Berechnungen besteht aus 20 Teiletypen, die teilweise von Kunden stammen und leicht in der Geometrie verändert wurden und teilweise von TRUMPF zu Vorführungszwecken benutzt werden. Aus diesen 20 Teiletypen werden 100 Schachtelungen zufällig generiert. Zuerst wird dafür die Teileanzahl einer Schachtelung zufällig und gleichverteilt zwischen 40 und 62 Teilen festgelegt. Dann wird ein Vektor aus ganzzahligen Zufallszahlen mit entsprechender Länge generiert, wobei die Zufallszahlen zwischen 1 und 20 gleichverteilt sind, was den 20 Teiletypen entspricht. Die Teiletypen werden so oft in der Schachtelung benutzt, wie sie im Zufallsvektor vorkommen. Die Teiletypen als Bilder und die Zusammenstellung der 100 Schachtelungen in tabellarischer Form sind in Anhang B dargestellt.

Es wird im Folgenden immer angenommen, dass der erste Steg direkt unter dem Rand des Blechs liegt. Der Abstand zwischen zwei Spitzen beträgt 15 mm, der Abstand zwischen zwei Stegen 67 mm. Das für die

Verkipfberechnung angenommene Material ist 2 mm dicker Baustahl mit einer Dichte von  $7856 \text{ kg/m}^3$ , der angenommene Gasdruck beträgt 15 bar bei einem Düsendurchmesser von 2 mm.

Um Auswirkungen von verschiedenen Gewichtungsfaktoren zu testen, werden verschiedene Varianten gerechnet. In einer ersten Variante wird ausschließlich die Bottom-Left-Regel mit zufälligen Freischnittpunkten angewandt und es kommt zu keiner weiteren Verschiebung. Die zweite Variante unterscheidet sich nur darin, dass die besten Freischnittpunkte genutzt werden.

Um die lokalen Verschiebungen von Teilen zu demonstrieren, werden dann mehrere Varianten mit verschiedenen Gewichtungsfaktoren berechnet. Bei der ersten Variante hat die Packungsdichte weiterhin die höchste Priorität mit  $w_{pd} = 5, w_k = 1, w_b = 1$ . Neben einer Variante, bei der die Gewichtungsfaktoren gleichberechtigt sind, gibt es zwei Varianten, bei denen die Stabilität der Teile wichtiger als die anderen beiden Faktoren ist mit  $w_{pd} = 1, w_k = 5, w_b = 1$  bzw.  $w_{pd} = 1, w_k = 10, w_b = 1$ . In der letzten Variante wird die Stegbeschädigung als wichtigstes Kriterium gesehen mit  $w_{pd} = 1, w_k = 1, w_b = 5$ .

Bei der Optimierung mit dem evolutionären Algorithmus ergibt sich das Problem, dass die Konvergenzzeiten nicht nur für unterschiedliche Schachtelungen variieren, sondern auch bei mehreren Berechnungsdurchläufen derselben Schachtelung. Der Vergleich zwischen den verschiedenen Parametrierungen kann durch diesen Effekt gestört werden. Deshalb wird zum Vergleich der verschiedenen Parametrierungen als Startreihenfolge eine Vorsortierung verwendet, wobei die Teile zuerst nach der längsten Seite aufsteigend und nachrangig nach der kürzeren Seite aufsteigend sortiert werden. Die Teile werden dann immer mit der längeren Seite quer zu den Auflagestegen platziert.

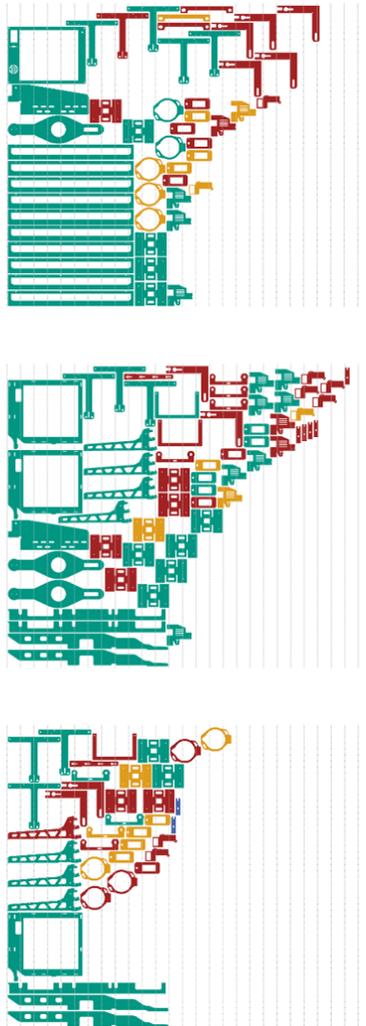
Trotzdem soll zusätzlich gezeigt werden, welche Ergebnisse der vorgestellte Optimierungsansatz erzielen kann. Dafür wurde der Elitismusfaktor so gewählt, dass immer nur die beste bekannte Lösung in die nächste Generation übernommen wird. Die Kreuzungs- und Mutationswahrscheinlichkeiten, die sowohl auf die Reihenfolge der Teile als auch ihre Winkellage wirken, wurden ebenfalls vor der Berechnung fixiert. Als mögliche Winkellagen war für jedes Teil  $0^\circ$  und  $90^\circ$  zulässig. In jeder Generation gab es 20 Lösungen, wovon jeweils 5 an der Tournament-Selektion teilneh-

men. Als Abbruchkriterium wurden 50 Iterationen gewählt, da die Angabe einer Lösungsqualität schwierig ist und eine Zeitschranke zu unterschiedlich vielen Optimierungsschritten führen könnte.

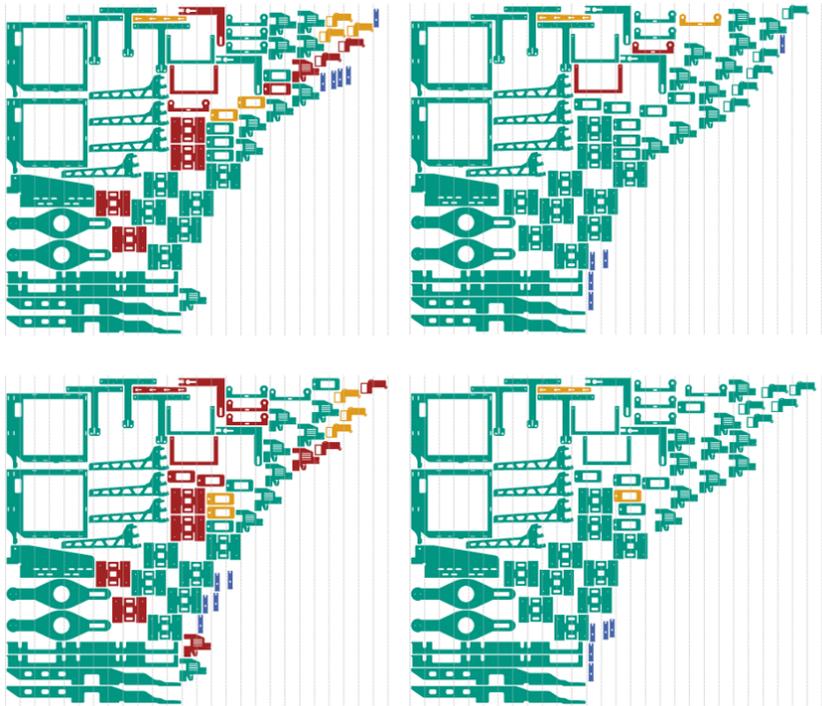
### 3.2.4 Ergebnisse und Diskussion der Konstruktionsheuristik

Die ersten drei der 100 Schachtelungen unter Anwendung der Bottom-Left-Methode ohne Verschiebungen mit zufälligem Freischnittpunkt sind in Abbildung 3.5 dargestellt. Es ist sofort ersichtlich, dass die Schachtelung mit dem Bottom-Left-Ansatz bei der benutzten Teilemenge zu Resultaten mit geringer Packungsdichte führt, wenn ein gerader Trennschnitt als Bewertungskriterium herangezogen wird. Dies liegt daran, dass die Teile beliebige Polygone sind und nicht nur Rechtecke oder Teile, deren konvexe Hülle ein Rechteck stark annähert. Die Teile haben dadurch eine größere Chance, an kleinen Ausbuchtungen der schon platzierten Teile hängen zu bleiben, weil sie nicht zurück nach rechts verschoben werden können, um dann nach unten verschoben zu werden. Deshalb werden die Teile eher in der oberen Hälfte des Blechs platziert, was natürlich zu einer schlechteren Packungsdichte führt. Der Effekt kann in den Abbildungen 3.5 und 3.6 beobachtet werden.

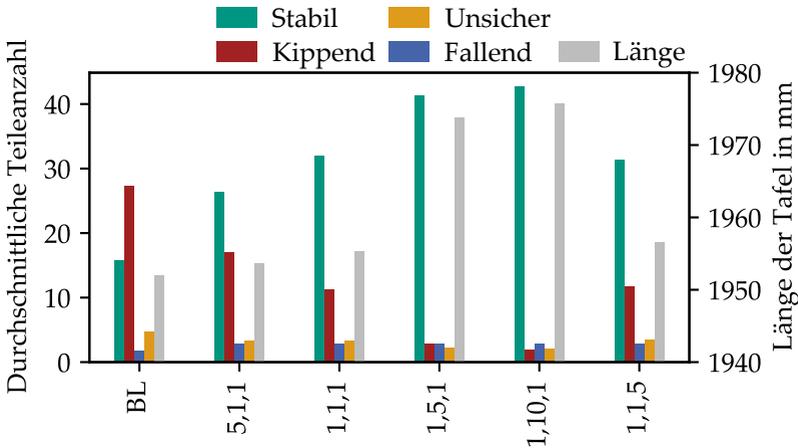
Veränderungen bei den Gewichtungen der Zielvariablen haben auch einen deutlichen Einfluss auf die Ergebnisse. Während bei dem Verfahren ohne Verschiebung durchschnittlich nur 15,8 Teile stabil sind, steigt diese Zahl deutlich, wenn Verschiebungen möglich sind, auf durchschnittlich bis zu 42,7 Teile. Die Anzahl der verkippenden Teile nimmt entsprechend ab. Die Anzahl der fallenden Teile nimmt ebenfalls leicht zu, wenn Verschiebungen möglich sind. Dies ist aber fast unabhängig von den exakten Gewichtungen. Die Anzahl der Teile, bei denen das Ergebnis der Verkippberechnung unsicher ist, nimmt bei geringerer Gewichtung der Fläche leicht ab, sinkt aber nicht unter im Durchschnitt 2 Teile. Die Länge des benötigten Blechs steigt wie erwartet mit geringerer Gewichtung der Packungsdichte an. Allerdings handelt es sich dabei im Durchschnitt um Unterschiede im einstelligen Millimeterbereich. Nur die beiden Gewichtungen, die die Stabilität der Teile sehr wichtig nehmen, benötigen deutlich längere Bleche. Die Ergebnisse der verschiedenen Parametrierungen sind



**Abbildung 3.5** Beispiele von Schachtelungen ohne Verschiebung mit der Konstruktionsheuristik. Grüne Teile sind stabil, rote Teile kippen, orangene Teile sind unsicher und blaue Teile fallen. Die  $x$ -Achse verläuft horizontal, die  $y$ -Achse vertikal.



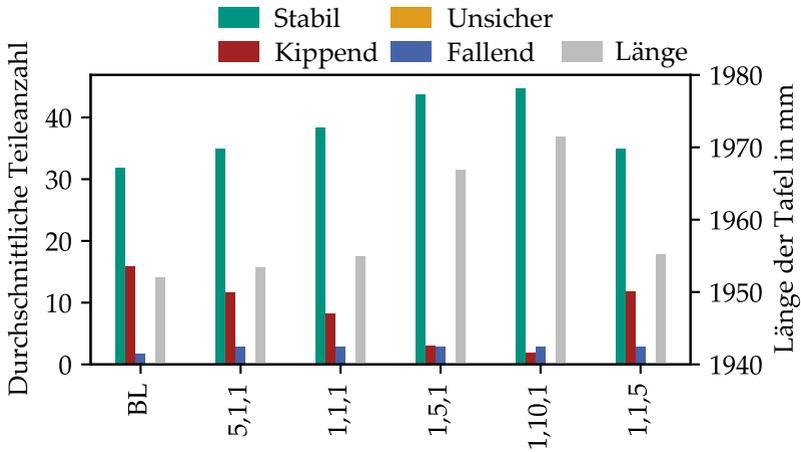
**Abbildung 3.6** Vergleich der Ergebnisse der Konstruktionsheuristik bei verschiedenen Gewichtungsfaktoren und zufälligem Freischnittpunkt. Oben links:  $w_{pd} = 1, w_k = 1, w_b = 1$ . Oben rechts:  $w_{pd} = 1, w_k = 5, w_b = 1$ . Unten links:  $w_{pd} = 1, w_k = 1, w_b = 5$ . Unten rechts:  $w_{pd} = 1, w_k = 10, w_b = 1$ .



**Abbildung 3.7** Vergleich der Ergebnisse bei zufälligem Freischnittpunkt bei verschiedenen parametrisierten Gewichtungsfaktoren. BL bezeichnet dabei Bottom-Left Schachtelung ohne Verschiebung, ansonsten sind die Gewichtungen in der Reihenfolge  $w_{pd}$ ,  $w_k$ ,  $w_b$  angegeben.

in Abbildung 3.7 zu sehen. Ein konkretes Beispiel einer Schachtelung mit unterschiedlichen Parametrierungen ist in Abbildung 3.6 dargestellt. Ein Grund, warum es selbst bei der Gewichtung  $w_{pd} = 1, w_k = 10, w_b = 1$  zu kippenden Teilen kommt, ist, dass die Teile nicht notwendigerweise in  $y$ -Richtung verschoben werden können, obwohl der lokale Suchraum groß genug dafür wäre. Zum Teil liegt das daran, dass es sonst zu Überlappungen mit bereits platzierten Teilen kommen würde, oder aber daran, dass der Tafelrand eine weitere Verschiebung verhindert.

Die Wahl des besten Freischnittpunkts führt zu deutlich mehr stabilen Teilen. Ohne Verschiebung und damit bei gleicher Packungsdichte sind nun 31,6 Teile stabil und damit fast doppelt so viele wie bei einem zufälligen Freischnittpunkt. Der Unterschied bei den stabilen Teilen zwischen dem zufälligen und optimalen Freischnittpunkt sinkt deutlich ab, wenn die Packungsdichte eher gering gewichtet wird. Der deutlichste Unterschied besteht bei den Teilen, deren Stabilität unsicher ist. Der Wert sinkt für alle Gewichtungen auf ungefähr 0,1 Teile ab. Wenig überraschend bleibt die Zahl der fallenden Teile im Grunde gleich. Die Zahl der kippenden Teile ist für Gewichtungen mit Fokus auf der Stabilität der Teile im Grunde genau so



**Abbildung 3.8** Vergleich der Ergebnisse bei bestem Freischnittpunkt und verschiedenen parametrisierten Gewichtungsfaktoren. BL bezeichnet dabei Bottom-Left Schachtelung ohne Verschiebung, ansonsten sind die Gewichtungen in der Reihenfolge  $w_{pd}$ ,  $w_k$ ,  $w_b$  angegeben.

groß wie bei einem zufälligen Freischnittpunkt. Dies spricht dafür, dass die Teile nicht durch den Gasdruck kippen, sondern schon ohne Betrachtung des Gasdrucks nicht stabil auf den Auflagestegen liegen. Entsprechend hat ein anderer Freischnittpunkt keine Auswirkung. Die Ergebnisse der verschiedenen Parametrierungen mit optimalem Freischnittpunkt sind in Abbildung 3.8 zusammengefasst.

Die Stegbeschädigung ist ausschließlich von der gewählten Gewichtung abhängig und nicht davon, ob ein optimaler oder zufälliger Freischnittpunkt gewählt wird. Die durchschnittliche Schnittlänge über dem Steg liegt zwischen 3880 mm und 3920 mm bei den Gewichtungen, die keinen großen Wert auf die Stegbeschädigung legen.

Bei den Schachtelungen mit der Gewichtung  $w_{pd} = 1$ ,  $w_k = 1$ ,  $w_b = 5$  verbessern sich diese Werte deutlich. Es kommt nur noch zu 2491 mm Schnittlänge über dem Steg.

Die Optimierung mit dem evolutionären Algorithmus ist in der Praxis durch hohe Rechenzeiten erschwert. Die Ergebnisse einer Schachtelung liegen bei den erwähnten Optimierungsparametern nach ungefähr 4 bis 7,5 Stunden vor. Deshalb wurden nur Ergebnisse für die ersten zehn Schach-

telungen berechnet. Das Problem bei der Optimierung mit dem evolutionären Algorithmus besteht darin, dass manchmal sehr gute Ergebnisse gefunden werden und manchmal nicht, was am recht großen Einfluss des Zufalls auf das Verfahren liegt. So liegt die durchschnittliche Länge des Blechs bei der Gewichtung  $w_{pd} = 1, w_k = 1, w_b = 1$  und der oben vorgestellten Vorgehensweise mit einer Vorsortierung bei 1695 mm mit einer Standardabweichung von ungefähr 242 mm. Dieser Durchschnitt sinkt auf 1482 mm, wenn die Startwerte des evolutionären Algorithmus rein zufällig sind. Wenn die Vorsortierung als ein Startwert genommen wird und alle anderen Startwerte zufällig sind, lässt sich eine weitere Verbesserung auf 1388 mm beobachten. Gleichzeitig steigt jedoch die Standardabweichung auf ungefähr 442 mm bzw. 460 mm. Im direkten Vergleich von einer Schachtelung in den verschiedenen Verfahren ergeben sich natürlich noch größere Abweichungen.

#### 3.2.5 Lösung durch eine Verbesserungsheuristik

Die Verbesserungsheuristik versucht von einer zulässigen Lösung aus die Schachtelung so zu verändern, dass nicht nur die Packungsdichte optimiert wird. Die Zielfunktion bleibt grundsätzlich als additive Funktion wie im vorhergehenden Abschnitt bestehen. Allerdings wird hier neben der Packungsdichte nur die Stabilität der Teile in der Zielfunktion betrachtet, da die Stegbeschädigung in der Praxis eine untergeordnete Rolle spielt. Das Ziel ist nun, einzelne Teile so zu verschieben, dass die gesamte Schachtelung im Sinne der Zielfunktion verbessert wird.

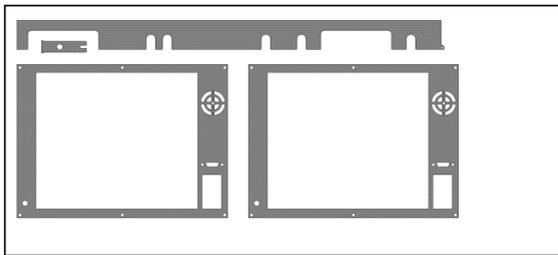
Bei der Verbesserungsheuristik wird als erstes durch einen beliebigen Algorithmus eine Basislösung generiert. Der alleinige Fokus liegt dabei auf einer möglichst hohen Packungsdichte. Für alle Berechnungen in dieser Arbeit gilt, dass die Basislösung mit der Software-Bibliothek des Unternehmens *Optalog SAS* erstellt wurde. Grundsätzlich gilt natürlich, dass eine möglichst gute Basislösung erreicht werden sollte.

Die Teile werden dann in eine Reihenfolge gebracht und nacheinander ggf. verschoben oder erneut platziert. Die Verschiebung findet dabei ausschließlich in  $x$ -Richtung statt, da in  $y$ -Richtung kein weiterer Platz zur Verfügung steht. In der Basislösung wird schließlich die gesamte Breite des Blechs benutzt. Vor der endgültigen Platzierung werden die Teile ggf.

zuerst verschoben. Grundsätzlich sollen die Teile, die sich näher am linken Rand befinden, also bei  $x = 0$ , zuerst eingefügt werden. Jedes andere Verfahren widerspricht dem Ziel des Strip Packings. Später eingefügte Teile liegen dann natürlicherweise weiter rechts und müssen ggf. zusätzlich weiter nach rechts verschoben werden.

Die Verschiebung hat dabei zwei Ziele. Zum einen muss sichergestellt sein, dass sich Teile nie überlappen und der Mindestabstand eingehalten wird. Zum anderen soll natürlich eine Position gefunden werden, bei der das Teil stabil durch die Auflagestege gelagert ist. Wie auch im vorhergehenden Abschnitt ist dabei die Position des Freischnittpunktes ein bedeutender Parameter.

Die beiden sinnvollen Methoden, um die Teile einer Schachtelung in eine Reihenfolge zu bringen, sind die jeweils aufsteigenden Ordnungen nach der kleinsten  $x$ -Koordinate eines Teils oder der größten  $x$ -Koordinate eines Teils. Je nach dem, wie die Teile ineinander greifen, kann dies große Auswirkungen auf die Verschiebungen der Teile und damit auf das finale Layout haben. Ein Beispiel ist in Abbildung 3.9 gezeigt. Von den oberen beiden Teilen wird das obere, längere Teil zuerst eingefügt, wenn die Teile nach der kleinsten  $x$ -Koordinate aufsteigend eingefügt werden. Wenn die Teile nach der größten  $x$ -Koordinate aufsteigend eingefügt werden, wird das untere, kleinere Teil zuerst eingefügt. Die unteren beiden Teile werden unabhängig von der Sortierung immer gleich eingefügt, nämlich zuerst das linke und dann das rechte.



**Abbildung 3.9** Vier Teile, an denen die verschiedenen Sortierungen erklärt werden können. Von den oberen beiden Teilen wird das obere Teil zuerst eingefügt, wenn nach der kleinsten  $x$ -Koordinate aufsteigend sortiert wird und das untere Teil, wenn nach der größten  $x$ -Koordinate aufsteigend sortiert wird. Bei den unteren beiden Teilen wird in beiden Fällen zuerst das linke und dann das rechte eingefügt.

Eine nachrangige Sortierung anhand der  $y$ -Koordinaten ist natürlich möglich, hat aber bei Vorversuchen zu keinen Unterschieden in den Ergebnissen geführt. Dies liegt wahrscheinlich daran, dass die geometrische Abhängigkeit von Teilen in der  $y$ -Richtung zufällig ist. Die gewählte Sortierung stammt aus der Beschreibung der Basislösung und ist zufällig.

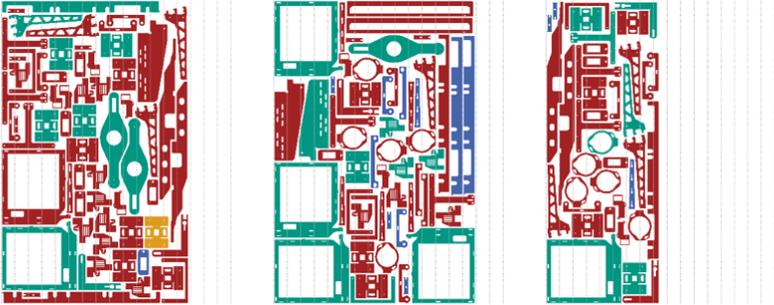
Das Einfügen eines Teils besteht dann darin, zuerst die Position aus der Basislösung zu prüfen. Liegt an dieser Position eine Überlappung mit anderen Teilen vor, weil diese bereits verschoben worden sind, wird das Teil so lange verschoben, bis keine Überlappung mehr vorliegt. Sonst wird geprüft, ob das Teil stabil liegt, verkippt oder durch die Stege fällt. Falls das Teil verkippen sollte oder das Ergebnis der Verkippberechnung ungewiss ist, wird das Teil um 1 mm verschoben und wieder eine Verkippberechnung durchgeführt. Dieses Verfahren wird so lange wiederholt, bis entweder eine stabilere Position gefunden werden kann oder eine vorher definierte maximale Verschiebung erreicht ist. Sollte für eine Platzierung des Teils ohne Überlappungen mit anderen Teilen eine größere Verschiebung als die maximale Verschiebung notwendig sein, wird diese selbstverständlich durchgeführt, da das oberste Ziel ist, tatsächlich alle Teile zu platzieren.

## 3.2.6 Berechnungen und Diskussion der Verbesserungsheuristik

### 3.2.6.1 Berechnungen und Ergebnisse

Die 20 Teiletypen und 100 Schachtelungen sind die gleichen wie in Kapitel 3.2.3.2. Falls nicht weiter vermerkt, werden auch alle sonstigen Parameter beibehalten, um möglichst vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Da nur noch in eine Richtung verschoben wird, ist eine Verschiebung, die größer als der Abstand zwischen zwei Stegen ist, nicht sinnvoll. Die maximale Verschiebung ist deswegen auf 67 mm beschränkt. Wird keine Position gefunden, an der das Teil stabil gelagert werden kann, verkippt das Teil an dieser  $y$ -Position immer.

Um die Ergebnisse mit denen der Konstruktionsheuristik vergleichen zu können, werden hier wieder zuerst die Berechnungen mit einem zufälligen Freischnittpunkt und danach mit dem besten Freischnittpunkt für die Basislösung durchgeführt. Bei Anwendung der Verschiebeheuristik von Teilen ist es nicht sinnvoll, einen zufälligen Freischnittpunkt zuzulassen,



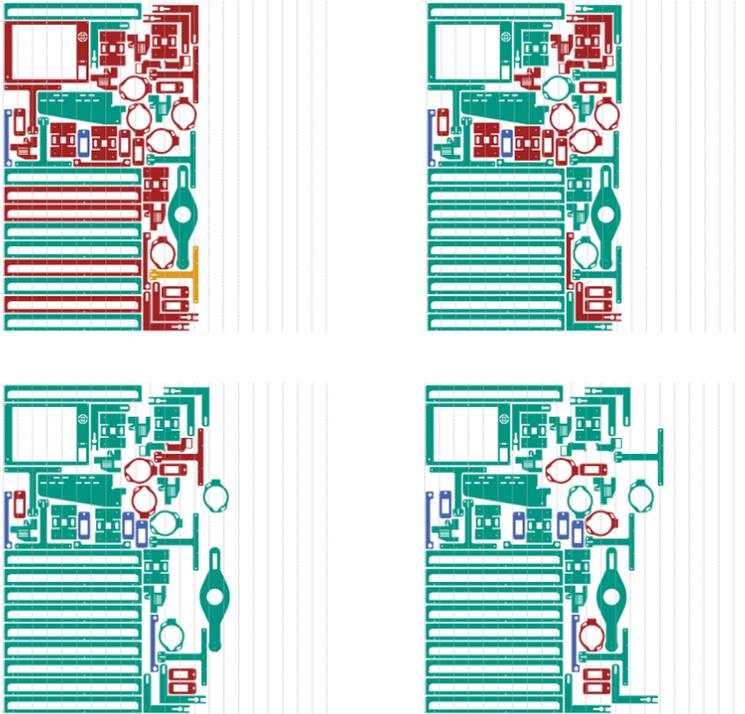
**Abbildung 3.10** Beispiele von Schachtelungen der Basislösung der Verbesserungsheuristik

da Teile dann weiter verschoben werden könnten, als notwendig wäre. Insgesamt ergeben sich also vier Berechnungsvarianten, die in Abbildung 3.11 an einem Beispiel gezeigt sind.

Die ersten drei der 100 Schachtelungen als Basislösung ohne Verschiebungen und mit zufälligem Freischnittpunkt sind in Abbildung 3.10 dargestellt. Die durchschnittlich benötigte Länge des Blechs über alle 100 Schachtelungen beträgt 1052,1 mm. Dabei sind durchschnittlich 11,3 Teile stabil, 33,5 Teile kippen, 4 Teile fallen und bei 0,9 Teilen ist das Ergebnis der Verkippberechnung nicht eindeutig. Wie schon bei der Konstruktionsheuristik verbessert sich dieses Ergebnis, wenn der beste Freischnittpunkt gesucht wird. Hier verkippem nur noch durchschnittlich 23 Teile und 22,6 Teile sind stabil. Die Anzahl der fallenden Teile bleibt natürlich konstant, während die Anzahl der ungewissen Teile auf 0 sinkt.

Die Verschiebung bei Sortierung der Teile nach aufsteigender kleinster  $x$ -Koordinate führt zu einer deutlich höheren Anzahl an durchschnittlich stabilen Teilen, nämlich 33,7. Es verkippem noch 5,1 Teile, 10,8 Teile fallen und bei keinem Teil ist die Verkippberechnung ungewiss. Durch die Verschiebungen steigt die durchschnittliche Blechlänge auf 1337 mm.

Bei der Sortierung der Teile nach aufsteigend größter  $x$ -Koordinate beträgt die durchschnittliche Blechlänge 1391,3 mm. Durchschnittlich sind 33,5 Teile stabil, 4,8 Teile verkippem, 11,3 Teile fallen und bei 0 Teilen ist das Ergebnis der Verkippberechnung ungewiss.



**Abbildung 3.11** Schachtelung 1 als Beispiel für die Verbesserungsheuristik. Oben links: Basislösung mit zufälligem Freischnittpunkt. Oben rechts: Basislösung mit besten Freischnittpunkt. Unten links: Verschiebung sortiert nach aufsteigend kleinster  $x$ -Koordinate. Unten rechts: Verschiebung sortiert nach aufsteigend größter  $x$ -Koordinate.

### 3.2.6.2 Diskussion

Es lässt sich durch den Vergleich der Abbildungen 3.5 und 3.10 erkennen, dass die Basislösungen für die Verbesserungsheuristik deutlich bessere Schachtelungen sind, als die Konstruktionsheuristik erstellen kann. Dies zeigt auch der Vergleich der durchschnittlichen Blechlängen mit 1052,1 mm und 1952 mm.

Wie schon bei der Konstruktionsheuristik führt die Auswahl des besten Freischnittpunkts zu einer deutlichen Verbesserung der Ergebnisse. Die Anzahl an stabilen Teilen wird verdoppelt. Da keine Verschiebung



**Abbildung 3.12** Schachtelung 94 als Beispiel für einen deutlichen Unterschied der Blechlänge in Abhängigkeit von der Sortierung. Oben: Aufsteigende Sortierung nach größter  $x$ -Koordinate. Unten: Aufsteigende Sortierung nach kleinster  $x$ -Koordinate.

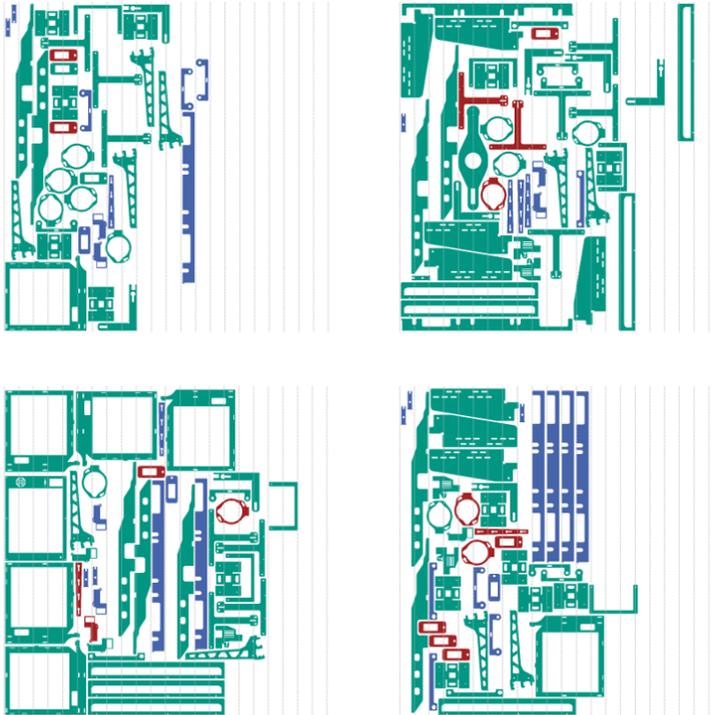
stattfindet, bleibt gleichzeitig die Anzahl der fallenden Teile und die Blechlänge gleich. Die Verschiebung von Teilen führt zu einer deutlich erhöhten Anzahl von stabilen Teilen, nämlich von durchschnittlich 22,6 Teilen auf 33,5 bzw. 33,7 Teile. Dies ist zwar auf den ersten Blick schlechter als die Zahlen bei der Konstruktionsheuristik, aber der Tatsache geschuldet, dass bei der Verbesserungsheuristik die Teile in zwei Drehrichtungen platziert werden können. Wenn die Summe aus stabilen und fallenden Teilen betrachtet wird, steht die Verbesserungsheuristik der Konstruktionsheuristik kaum nach. Bei der Verbesserungsheuristik sind dies 44,5 bzw. 44,8 Teile und bei der Konstruktionsheuristik im besten Fall mit der Parametrierung  $w_{pd} = 1$ ,  $w_k = 10$ ,  $w_b = 1$  45,1 Teile. Die Verbesserungsheuristik bietet aber den Vorteil von deutlich kompakteren Schachtelungen.

Der Einfluss der Drehrichtung der Teile kann eindeutig beim Vergleich der Ergebnisse der beiden Heuristiken gesehen werden. Während die Konstruktionsheuristik die Teile immer mit der längeren Dimension in  $x$ -Richtung legt, können die Teile bei der Verbesserungsheuristik um  $90^\circ$  gedreht werden. Entsprechend fallen hier statt ungefähr 2,9 Teilen im Durchschnitt ungefähr 11 Teile im Durchschnitt durch die Auflagestege und haben keine stabile Position. Dass der Einfluss der Drehrichtung so drastisch ausfällt, hat vor allem mit der zugrunde liegenden Teilemenge zu

tun, die recht viele Teile enthält, die insgesamt eher klein sind (z. B. Teil 5, Teil 7 oder Teil 8) oder eine relativ lange und eine kurze Dimension haben (z. B. Teil 9, Teil 15 und Teil 19) und deswegen in einer Rotationslage fallen können. Der Einfluss der Rotationslage würde geringer ausfallen, wenn es weniger solche Teile geben würde.

Während die Unterschiede zwischen den Sortierregeln bei der durchschnittlichen Stabilität der Teile sehr gering ausfallen, gibt es einen systematischen Unterschied bei der Blechlänge. Die Sortierung nach kleinster  $x$ -Koordinate ist im Durchschnitt 54,3 mm kürzer bei einer Standardabweichung von 146,2 mm. Die maximale Abweichung bei einzelnen Schachtelungen kann bis zu 725 mm betragen. Diese Unterschiede lassen sich dadurch erklären, dass bei der Sortierung nach größter  $x$ -Koordinate größere Teile später eingefügt werden und dann unter Umständen nicht ausreichend Platz vorhanden ist, da die kleineren Teile um das Teil herum verschoben worden sein können. Das größere Teil muss dann recht weit verschoben werden, um ohne Überlappung platziert werden zu können. Ein Beispiel dafür ist die Schachtelung 94, die in Abbildung 3.12 gezeigt ist.

Auffällig ist, dass insbesondere die zuletzt platzierten Teile unter Umständen eine besonders ungünstige Position einnehmen können. Dies liegt daran, dass die Teile nie in  $y$ -Richtung verschoben werden. Sie bleiben also an ihrer  $x$ -Position aus der Basislösung, was aber gegeben die verschobene Position aller anderen Teile eine wenig kompakte Schachtelung ergeben kann. Vier Beispiele dafür sind in Abbildung 3.13 dargestellt. Bei den linken beiden Schachtelungen könnten die Teile weiter unten besser platziert werden. Bei den rechten beiden Schachtelungen müssten schon mehrere Teile neu platziert werden, um zu einer kompakteren Schachtelung zu gelangen.



**Abbildung 3.13** Vier Schachtelungen, bei denen die am weitesten rechts platzierten Teile auch eine andere Position einnehmen hätten können, die zu einer kompakteren Schachtelung geführt hätte.



# 4 Zusammenfassung und Ausblick

## 4.1 Zusammenfassung

Die Prozesssicherheit von LFMn beim Schneiden von Blechen kann erhöht werden, indem die Position und der Zustand der Auflagestege detektiert und die geplante Bearbeitung so angepasst wird, dass mögliche Probleme, wie z. B. eine Kollision des Schneidkopfs mit einem verkippten Teil oder die unnötig starke Beschädigung der Auflagestege, vermieden werden. In dieser Arbeit wurden dazu drei verschiedene Arten der Auflagestegeberkennung vorgestellt, weiter entwickelt und neue Verfahren zur Schachtelung unter Berücksichtigung der Auflagestege präsentiert.

Die Stegdetektion mittels Laser-Triangulation ist ein im Grundsatz lange bekanntes Verfahren. Um die Auflagestege ohne störende Reflexionen und möglichst genau vermessen zu können, wurden sowohl die Laserlinie als auch die Kamera nicht direkt über dem zu messenden Steg platziert. So konnten Abschattungen verhindert werden und die wenigen Artefakte durch Reflexionen lassen sich fast vollständig entfernen. Die Messmethode wurde validiert und konnte Genauigkeiten im Submillimeterbereich erreichen.

Ein im Aufbau deutlich einfacheres Verfahren ist die Stegdetektion auf einzelnen Bildern im sichtbaren Spektrum. Hier wurden verschiedene aus der Bildverarbeitung bekannte Methoden auf ihre Leistungsfähigkeit bei dieser Anwendung überprüft. Kanten- und Eckendetektoren sowie Texturanalysemethoden konnten dabei keine guten Ergebnisse erzielen. Die Filterung der Frequenzen, die dem Stegabstand entsprechen, konnte die besten Ergebnisse erzielen. Die meisten Fehler wurden dabei in dem Drittel der Palette gemacht, bei dem die Auflagestege bedingt durch die Kameraposition von der Seite gesehen werden und Störeinflüsse z. B. durch

die Verschmutzung der Stege oder durch Überlappung von Spitzen und Senken benachbarter Stege stärker ausgeprägt sind.

Um dieses Problem besser bewältigen zu können, wurde eine aktive Beleuchtung im Nah-Infrarot Spektrum getestet. Durch eine Position, bei der die Stegspitzen von oben und hinten angeleuchtet werden, entsteht ein fast vollständig schwarzes Bild, bei dem die Stegspitzen als helle Punkte dargestellt werden. Die Vorderseiten der Stege können also keine Störeinflüsse mehr ins Bild einbringen, wodurch die Genauigkeit der Stegerkennung entsprechend steigt. Zudem konnten nun gute Ergebnisse bei der Erkennung einzelner Spitzen erzielt werden.

Die mit den Bildverarbeitungsmethoden gewonnenen Informationen können dann zur Optimierung des NC-Programms eingesetzt werden. In dieser Arbeit wurde als Ansatz für diese Optimierung vor allem die Schachtelung unter Berücksichtigung verschiedener Freischnittpunkte betrachtet. In der zuerst vorgestellten Konstruktionsheuristik wird die Bottom-Left Regel benutzt, um die Teile nacheinander auf dem Blech zu platzieren. Nach der ursprünglichen Platzierung wird die Stabilität und die Stegbeschädigung geprüft und das Teil ggf. entgegen der Bottom-Left Richtungen verschoben, um eine bessere Position zu finden. Die Optimierung der Freischnittposition bringt alleine schon eine bedeutende Verbesserung. Zusammen mit dem Verschiebverfahren konnte eine sehr große Verbesserung erreicht werden, bei der nur noch vereinzelt Teile verkippen werden.

Bei der zuletzt betrachteten Verbesserungsheuristik werden vorhandene Schachtelungsalgorithmen benutzt, um Schachtelungen mit möglichst wenig Verschchnitt als Basislösung zu generieren. Die Teile werden dann aufsteigend sortiert, entweder nach der kleinsten oder größten  $x$ -Koordinate und in dieser Reihenfolge platziert. Dabei wird ein Teil so lange in  $x$ -Richtung verschoben, bis es ohne Überlappung platziert werden kann. Zusätzlich wird die Stabilität des Teils geprüft und im negativen Fall wird versucht, durch Verschieben entlang der  $x$ -Achse eine stabilere Position zu finden. Die Verbesserungsheuristik liefert ähnlich gute Ergebnisse wie die Konstruktionsheuristik beim Verhindern von verkippten Teilen, kann aber deutlich kompaktere Schachtelungen generieren, da schon die Basislösungen sehr viel kompakter sind.

## 4.2 Ausblick

Für die in dieser Arbeit vorgestellten Methoden gibt es verschiedene Möglichkeiten zur Weiterentwicklung.

Zur Verbesserung der Stegvermessung mittels Laser-Triangulation könnten zukünftige Arbeiten einen ähnlichen Aufbau in einer Laborumgebung wiederholen. Dies würde eine deutlich exaktere Bestimmung aller Messfehler und damit einer bessere Validierung ermöglichen.

Eine weitere interessante Frage ist, die Stegbeschädigung und Verschlackung bei produktiv eingesetzten Maschinen zu vermessen. Eine solche Messung wird das Verständnis über die Beschädigungsprozesse und ihre Einflussfaktoren verbessern. Darauf aufbauend können Methoden zur Verminderung der Beschädigung vorgeschlagen und getestet werden. Des Weiteren könnte das Verständnis über die Verschlackung von Stegen auch neue Erkenntnisse zum Laserschneidprozess ermöglichen.

In zukünftigen Arbeiten zur Stegdetektion auf einzelnen Bildern aus dem sichtbaren Spektrum sollte untersucht werden, ob mit weitergehenden Verfahren der Bildverarbeitung eine exakte Detektion der Stegspitzen möglich ist. Denkbar ist beispielsweise der Einsatz künstlicher neuronaler Netze, insbesondere von CNNs, die in vielen anderen Anwendungen der Bildverarbeitung außerordentlich gute Ergebnisse erzielen. Dafür ist allerdings eine größere Datenbasis notwendig. Es ist auch interessant, künstliche neuronale Netze bei der Auswertung von Bildern aus dem NIR-Spektrum einzusetzen. Hier stellt neben einer reinen Lokalisierung auch die Zustandsmessung eine realistische Option dar.

Nicht zuletzt können weitere Einsatzgebiete einer NIR-Beleuchtung an einer LFM erforscht werden, wenn man die Betrachtungsgrenze anders als in dieser Arbeit nicht direkt nach dem Schneidprozess zieht. Beispiele sind die Vermessung der Blechlage außerhalb des Maschinenkörpers oder die Detektion verkippter Teile nach dem Schneidvorgang. Letzteres ist wichtig, um Kollisionen von automatisierten Absortieranlagen zu verhindern.

Auch bei der Programmierung von LFMn gibt es Ansätze für weitere Forschungsarbeiten. Bei der Konstruktionsheuristik hat sich gezeigt, dass der in dieser Arbeit verfolgte Ansatz nur in wenigen Fällen gute Schachtelungen erstellen kann. Eine ähnlich tiefe Einbettung in einen Schachtelungs-

algorithmus, der das NFP als Ansatz benutzt, wäre für einen objektiven Vergleich mit Verbesserungsheuristiken notwendig.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Verbesserungsheuristik könnte noch kompaktere Ergebnisse erzeugen, wenn das Problem von einzelnen relativ zum Schluss platzierten Teilen, die weit aus der restlichen Schachtelung herausragen, adressiert wird. Dazu könnten diese Teile an anderen  $y$ -Positionen oder auch in anderen Rotationen platziert werden, möglicherweise sogar durch den Schachtelungsalgorithmus, mit dem die Basislösung erzeugt wurde. Dazu würden einige Teile neu platziert werden, wobei die meisten Teile in ihrer von der Verbesserungsheuristik bestimmten Lage verbleiben würden. Ein weiterer Ansatz, der bei der Verbesserungsheuristik untersucht werden sollte, ist die Verschiebung der Teile in  $y$ -Richtung. Dafür müsste das Blech auch in dieser Dimension nicht voll belegt sein.

# Anhang



# A Verkipfberechnung bei geschnittenen Teilen

Das hier vorgestellte Vorgehen zur Verkipfberechnung von Teilen ist schon länger bei TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH + Co. KG bekannt und wurde schon in Abschlussarbeiten dokumentiert (siehe z. B. [70]). Der beschriebene Ablauf der Verkipfberechnung ist nochmal schematisch in Abbildung A.1 dargestellt.

Wenn Teile auf einer LFM geschnitten wurden, können sie abhängig von ihrer Lagerung durch die Stegspitzen und die von oben durch den Gasdruck in das Teil eingeleitete Kraft (im Folgenden "Gaskraft" genannt) entweder durch das Restgitter nach unten fallen, im Restgitter verkippen oder stabil liegen bleiben.

Um a priori zu berechnen, welchen Zustand ein Teil einnehmen wird, müssen vier Dinge bekannt sein:

- Geometrie des Teils und Position des Teils relativ zu den Stegen,
- Position des Schwerpunkts und Größe der Schwerkraft,
- Freischnittpunkt und Größe der Gaskraft.

Im ersten Schritt der Verkipfberechnung werden die Auflagestellen des Teils berechnet. Dazu wird geprüft, welche Stegspitzen in der gegebenen Position des Teils relativ zu den Stegen das Teil stützen. Entweder das Teil hat keine Auflagepunkte. Dann soll im Folgenden angenommen werden, dass das Teil nach unten durch das Restgitter fallen wird. Dies ist in der Realität nicht zwangsweise der Fall, da z. B. ein Teil auch im Restgitter verhaken kann. Wenn das Teil genau einen oder mehrere Auflagepunkte, die aber alle zum gleichen Steg gehören, hat, wird das Teil verkippen. Entweder wird das Teil unter Einfluss der Gaskraft verkippen oder nach dem Schneiden ohne Einfluss der Gaskraft. Es ist theoretisch möglich, dass

der Schwerpunkt des Teils und der Angriffsort der Gaskraft genau über dem Auflagesteg sind und das Teil somit stabil liegen bleibt. Bei diesem Fall handelt es sich offensichtlich um ein labiles Gleichgewicht, das nicht lange Bestand haben würde. Deshalb werden Teile, deren Auflagepunkte zu einem Steg gehören, als verkippend klassifiziert. Wenn ein Teil mehr als zwei Auflagepunkte hat, die zu verschiedenen Auflagestegen gehören, muss zur Verkippberechnung erst geprüft werden, ob das Teil ohne Einfluss der Gaskraft stabil ist. Dazu muss sich der Schwerpunkt des Teils innerhalb der konvexen Hülle der Auflagepunkte befinden. Wenn das nicht der Fall ist, wird das Teil als verkippend klassifiziert.

Wenn sich der Schwerpunkt des Teils in der konvexen Hülle der Auflagepunkte befindet, muss als letzter Schritt geprüft werden, wie sich das Teil unter Einfluss der Gaskraft verhält. Falls sich der Angriffspunkt der Gaskraft ebenfalls in der konvexen Hülle der Auflagepunkte befindet, ist das Teil stabil. Wenn nicht, muss die Drehachse des Teils bestimmt werden und die Drehmomente, die durch die Schwerkraft und Gaskraft ausgelöst werden, müssen berechnet werden. Die Drehachse des Teils kann bestimmt werden, indem der Schnittpunkt der Geraden zwischen dem Schwerpunkt und dem Freischnittpunkt und der konvexen Hülle der Auflagepunkte berechnet wird. Die Seite der konvexen Hülle, auf der dieser Schnittpunkt liegt, ist auch die Drehachse des Teils. Falls der Schnittpunkt auf einer Ecke der konvexen Hülle liegt, werden beide angrenzenden Achsen jeweils geprüft und das Ergebnis mit der höheren Kippwahrscheinlichkeit gewertet. Das Drehmoment, das durch die Schwerkraft ausgelöst wird, lässt sich aus der kürzesten Distanz  $d_{F_S}$  zwischen dem Schwerpunkt des Teils und der Drehachse, sowie der Schwerkraft des Teils  $F_S$  bestimmen. Der Hebelarm der Gaskraft ist die kürzeste Distanz  $d_{F_G}$  zwischen dem Freischnittpunkt und der Drehachse. Die Gaskraft  $F_G$  wird durch den Durchmesser der Schneiddüse  $d_D$  und den Gasdruck  $p_G$  abgeschätzt:

$$F_G = \pi \cdot \left(\frac{d_D}{2}\right)^2 \cdot p_G$$

Das Gesamtdrehmoment des Teils ergibt sich aus der Summe der beiden Drehmomente:

$$M_{\text{ges}} = F_S \cdot d_{F_S} - F_G \cdot d_{F_G}.$$

Dabei wird die Richtung des durch die Schwerkraft ausgelösten Drehmoments als positive Richtung definiert. Da der Angriffspunkt der Schwer-

kraft in der konvexen Hülle der Auflagepunkte liegt und der Angriffspunkt der Gaskraft außerhalb, ist das durch die Gaskraft ausgelöste Drehmoment negativ.

Ist  $M_{\text{ges}}$  positiv, überwiegt das Drehmoment der Schwerkraft und das Teil bleibt stabil liegen. Ist  $M_{\text{ges}}$  negativ, überwiegt hingegen das Drehmoment der Gaskraft und das Teil verkippt. Um die Ungewissheit, die durch verschiedene Abschätzungen in diesem Verfahren eingeführt wird, etwas abzufangen, wird die Stabilität des Teils als unsicher klassifiziert, wenn  $M_{\text{ges}}$  nahe an null ist. Dies wird durch eine festzulegende Schranke  $M_b$  getan. Der Kippzustand eines Teils gilt als unsicher, wenn  $|M_{\text{ges}}| < M_b$  gilt. In allen Auswertungen dieser Arbeit wurde  $M_b = 10 \text{ Nmm}$  gewählt, was in vorhergehenden Arbeiten experimentell als angemessener Wert ermittelt wurde [70].

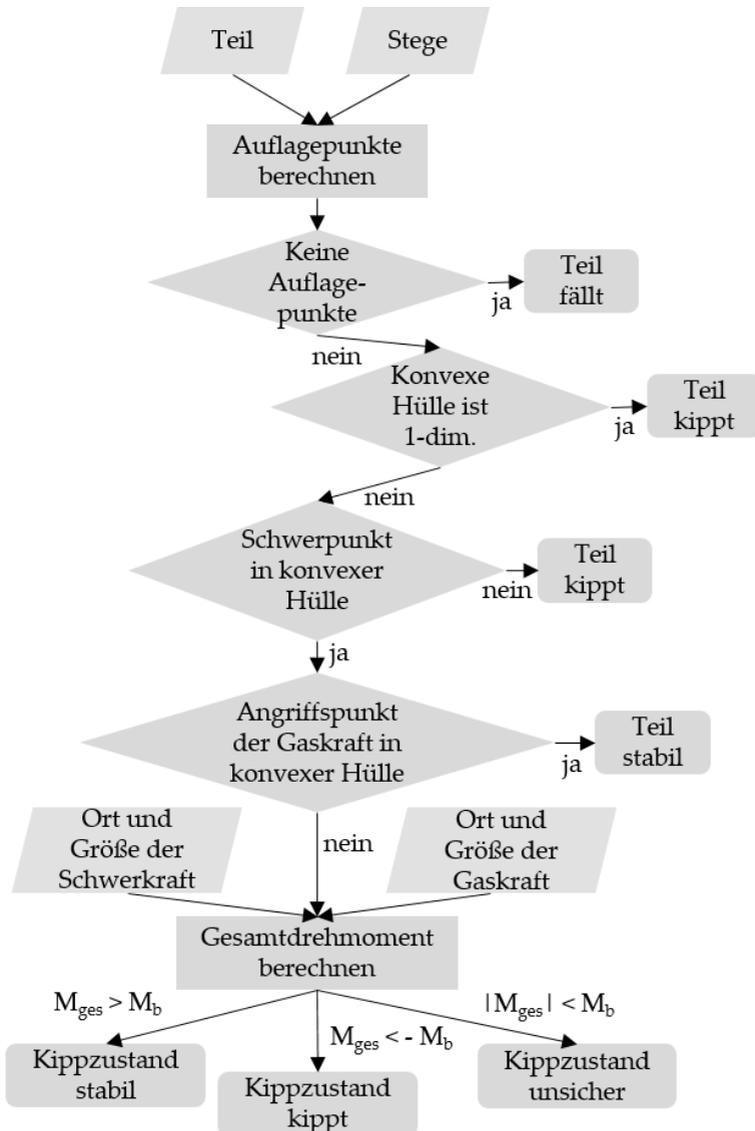
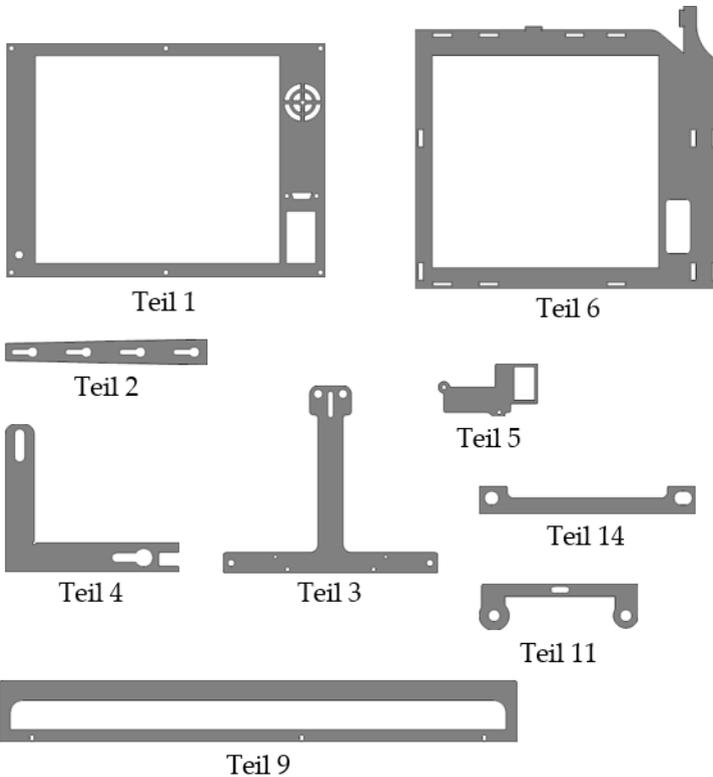


Abbildung A.1 Schematische Darstellung der Verkipfberechnung.

## B Teile und Schachtelungen

Um die erwähnten Berechnungen durchzuführen, wurden die auf den nächsten beiden Seiten dargestellten 20 Teile benutzt. In der darauf folgenden Tabelle ist dargestellt, wie oft ein Teil in einem der 100 Schachtelungen vorkommt.





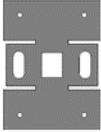
Teil 7



Teil 8



Teil 13



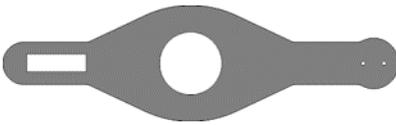
Teil 10



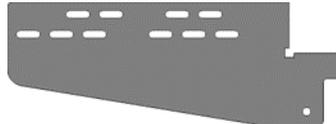
Teil 16



Teil 12



Teil 20



Teil 17



Teil 18



Teil 15



Teil 19

Teilesset	Teile-Nr.																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1	0	5	5	2	0	0	7	10	5	0	5	0	3	0	5	1	0	0	1
2	0	1	3	2	2	1	2	5	0	5	4	0	4	0	2	5	0	1	1	0
3	0	1	3	2	5	2	5	7	0	10	4	10	4	0	2	0	1	2	2	2
4	0	2	5	2	4	0	2	0	2	3	1	0	10	1	0	0	5	0	1	2
5	2	0	0	0	0	0	0	10	2	12	0	12	0	5	0	0	0	5	1	2
6	2	3	4	3	1	1	1	5	6	1	2	4	3	3	2	4	0	4	2	1
7	2	1	1	2	2	4	4	1	3	3	4	3	0	4	3	2	0	2	2	1
8	3	2	8	3	1	6	2	3	6	3	1	1	4	4	5	1	3	1	2	0
9	1	3	1	3	0	3	2	4	4	2	1	4	2	4	1	1	0	1	5	0
10	1	4	2	2	2	3	1	5	3	4	0	3	0	3	5	3	3	3	2	1
11	1	2	0	2	5	1	1	1	4	1	4	5	2	2	5	6	3	2	4	0
12	0	3	3	0	3	1	5	2	2	6	4	1	2	2	2	1	0	1	2	3
13	2	1	2	1	3	5	2	1	4	0	2	1	1	2	1	2	3	3	1	3
14	0	6	2	1	2	4	5	1	2	4	4	6	1	4	0	5	2	3	3	1
15	1	2	0	1	1	6	3	2	8	3	1	1	3	6	4	4	8	2	3	0
16	0	1	0	2	2	4	0	3	6	2	1	6	1	3	1	2	3	3	2	1
17	2	6	4	4	5	6	3	5	2	4	3	1	2	2	2	2	1	2	1	1
18	0	1	2	2	2	3	4	4	0	4	1	1	4	0	4	4	3	0	3	2
19	3	2	3	2	3	2	1	6	4	2	4	6	1	3	4	4	3	0	5	0
20	0	0	3	4	1	4	5	1	1	3	2	1	1	1	4	4	1	2	5	2
21	0	0	1	6	1	0	0	4	1	4	3	1	6	0	4	4	2	1	4	1
22	0	0	1	3	0	2	1	2	2	3	3	1	4	2	1	4	3	4	3	1
23	0	3	0	2	4	3	2	3	2	1	2	3	0	3	3	4	2	1	5	0

Teilesatz	Teile-Nr.																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
24	1	1	1	3	3	3	1	3	0	0	0	3	2	6	3	2	3	2	2	1
25	1	2	2	2	1	6	2	4	1	4	4	4	4	4	4	1	0	3	4	2
26	2	4	5	1	3	4	0	2	4	2	1	2	0	3	1	1	4	1	3	0
27	1	0	0	0	2	2	7	2	2	2	1	1	3	6	3	3	5	1	4	0
28	1	2	1	5	5	3	2	1	1	1	2	2	4	3	2	4	3	3	3	0
29	2	2	2	1	1	1	2	1	1	1	1	3	1	3	6	3	2	4	3	3
30	1	3	2	2	2	2	5	5	3	5	2	1	5	0	7	4	0	5	2	3
31	1	5	2	0	1	3	0	4	6	4	1	3	2	2	2	5	0	4	1	2
32	1	4	0	1	1	4	1	3	0	7	2	2	5	8	0	2	2	1	2	0
33	1	3	1	2	3	4	3	4	3	2	7	0	4	3	1	1	3	3	1	2
34	2	2	3	2	4	4	1	2	3	3	3	3	7	3	5	2	2	0	3	1
35	2	3	2	1	5	1	2	7	1	3	2	0	0	0	4	3	2	5	3	2
36	1	0	2	2	5	5	4	2	1	2	3	3	2	1	2	5	5	2	3	2
37	2	4	1	1	3	2	2	0	2	4	1	6	5	5	1	2	4	2	2	0
38	1	3	2	3	0	2	2	4	2	6	4	2	8	4	5	2	2	3	3	0
39	3	4	2	2	2	3	2	3	4	1	2	4	2	2	1	6	3	5	3	1
40	0	3	6	4	2	0	2	1	4	2	2	2	2	2	2	4	5	2	2	1
41	2	3	5	4	4	4	2	2	1	4	3	1	1	1	1	3	0	1	3	3
42	0	3	2	3	2	2	2	4	8	4	0	1	3	2	1	4	2	2	2	1
43	1	4	3	1	1	2	3	1	1	1	1	1	7	1	5	3	2	2	3	0
44	1	2	6	0	2	4	0	0	3	4	4	2	3	3	4	1	7	1	2	3
45	0	3	2	2	4	0	4	2	4	2	3	2	3	3	5	0	2	3	2	1
46	2	2	4	3	4	4	4	3	3	1	3	4	1	1	3	3	6	3	4	0

Teileset	Teile-Nr.																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
47	0	5	4	8	4	2	3	3	4	1	0	4	4	0	2	4	2	5	2	1
48	3	5	2	3	3	2	4	2	4	4	2	2	4	1	0	2	5	5	3	0
49	0	2	3	1	5	4	2	5	2	5	2	1	1	2	2	6	3	7	2	1
50	3	3	3	3	3	2	3	2	2	1	1	5	1	3	8	2	0	2	6	2
51	1	6	2	1	3	1	4	4	1	2	1	2	2	2	2	3	3	3	4	1
52	3	3	4	4	1	4	2	3	4	4	3	1	3	1	3	4	4	1	1	2
53	1	2	5	4	4	1	1	1	3	2	2	0	1	2	4	6	2	3	2	1
54	2	2	4	1	1	0	4	1	2	5	2	2	3	4	1	2	3	2	4	3
55	2	1	1	3	6	1	3	3	2	1	1	3	3	3	5	3	1	3	3	2
56	0	4	8	4	1	4	5	4	1	3	0	5	2	5	1	1	1	2	1	1
57	0	2	4	1	1	3	4	2	3	3	5	2	8	2	2	4	1	4	2	1
58	1	2	0	3	7	2	3	2	4	5	0	8	2	1	2	3	1	2	3	3
59	0	1	1	3	2	2	4	2	4	2	0	3	4	2	2	5	2	2	3	1
60	1	2	0	2	1	3	2	3	5	2	2	2	2	3	1	3	3	2	3	1
61	2	1	3	1	0	4	3	3	4	3	2	2	3	0	1	3	6	9	0	1
62	0	1	2	2	5	1	6	4	2	4	4	5	3	3	3	2	7	0	3	0
63	2	2	0	1	4	0	3	6	4	2	2	4	3	6	4	4	7	1	1	1
64	1	3	1	4	3	1	5	8	4	4	2	0	3	1	2	2	2	0	4	2
65	0	3	5	3	4	0	4	2	3	2	3	2	3	7	3	3	3	5	3	0
66	0	5	2	1	2	2	2	3	3	2	3	3	1	4	5	3	7	1	1	1
67	3	2	2	2	4	2	4	1	0	7	3	4	3	1	4	2	4	2	1	2
68	0	1	3	4	3	1	2	5	1	0	3	1	2	6	3	2	3	0	4	0
69	1	3	2	1	7	1	5	2	0	1	5	4	3	2	1	1	1	3	5	1

Teilesatz	Teile-Nr.																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
70	1	1	1	0	5	2	3	4	1	6	3	4	0	1	3	4	3	1	1	1
71	0	3	3	2	4	6	5	4	2	0	3	2	2	3	3	3	0	3	2	2
72	1	7	5	1	4	5	5	3	1	1	4	2	2	3	2	3	3	4	1	2
73	1	5	3	3	3	2	3	4	1	1	4	4	2	0	1	1	5	5	2	4
74	2	0	1	2	10	2	2	0	4	7	4	0	5	3	3	1	4	1	2	2
75	1	4	1	2	1	4	3	1	2	8	3	4	2	0	2	8	1	1	4	1
76	3	2	3	3	2	3	3	3	2	1	2	2	2	1	2	2	3	3	1	0
77	2	0	4	0	2	0	4	2	2	1	1	5	6	1	0	1	3	4	4	2
78	0	2	6	4	2	3	4	2	1	4	4	3	3	1	5	2	3	2	1	0
79	0	3	2	0	3	4	4	1	2	2	3	3	2	1	3	4	2	4	5	3
80	0	4	3	5	2	1	3	4	2	2	2	4	3	3	2	4	3	3	1	3
81	0	6	1	2	3	2	1	0	3	3	3	1	5	1	3	6	1	2	4	0
82	0	2	3	2	0	3	4	4	2	1	3	3	2	3	1	2	6	1	2	3
83	1	2	2	1	5	1	2	1	2	4	2	2	3	3	1	5	1	2	2	1
84	1	5	3	1	5	0	2	2	4	3	4	3	2	3	3	5	3	6	2	0
85	1	0	0	2	2	1	2	5	3	6	1	2	4	4	2	5	2	4	7	0
86	0	1	0	1	1	1	3	5	1	6	4	2	2	3	2	3	3	1	4	0
87	3	1	6	1	0	4	3	3	1	1	3	0	2	3	1	6	5	3	2	4
88	1	1	2	2	1	2	2	1	1	2	1	2	5	8	4	4	2	1	1	0
89	1	2	4	1	5	5	2	2	3	1	1	1	2	1	3	2	0	2	2	0
90	1	4	1	3	1	2	1	3	6	2	2	1	3	2	0	4	2	1	4	4
91	1	2	1	1	2	3	4	1	2	3	1	3	1	6	3	1	3	6	0	0
92	1	1	2	2	3	0	3	2	0	4	6	3	4	4	3	0	3	6	2	1

Teileset	Teile-Nr.																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
93	1	5	7	4	3	2	2	2	2	4	3	0	3	3	4	3	2	0	4	3
94	1	3	3	2	1	4	3	2	5	4	2	1	1	4	3	3	3	1	6	0
95	1	3	2	3	2	2	2	4	3	4	2	4	0	3	0	3	2	7	4	1
96	0	1	1	3	2	2	1	3	3	3	4	0	3	2	4	3	2	2	3	2
97	1	3	2	6	2	5	3	0	1	1	3	3	1	3	0	4	4	1	0	3
98	2	0	3	2	5	1	4	4	0	2	3	2	3	1	4	2	5	4	0	1
99	2	1	4	4	2	3	1	3	2	0	4	6	2	2	1	2	2	3	3	0
100	0	3	6	4	3	1	3	0	2	1	2	1	1	1	2	4	3	1	3	0



# Literaturverzeichnis

- [1] **A. Abouelela, H. M. Abbas, H. Eldeeb, A. A. Wahdan und S. M. Nassar.** *Automated vision system for localizing structural defects in textile fabrics.* In: *Pattern Recognition Letters* 26 (2005), S. 1435–1443.
- [2] **R. Alvarez-Valdes, A. Martinez und J. M. Tamarit.** *A branch & bound algorithm for cutting and packing irregularly shaped pieces.* In: *International Journal of Production Economics* 145.2 (2013), S. 463–477.
- [3] **R. C. Art Jr.** *An approach to the two dimensional irregular cutting stock problem.* Diss. Massachusetts Institute of Technology, 1966.
- [4] **P. Bamforth, M. Jackson und K. Williams.** *Transmissive dark-field illumination method for high-accuracy automatic lace scalloping.* In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 32.5-6 (2007), S. 599–607.
- [5] **J. A. Bennell und J. F. Oliveira.** *A tutorial in irregular shape packing problems.* In: *Journal of the Operational Research Society* 60.sup1 (2009), S. 93–105.
- [6] **J. A. Bennell und J. F. Oliveira.** *The geometry of nesting problems: A tutorial.* In: *European Journal of Operational Research* 184.2 (2008), S. 397–415.
- [7] **J. Beyerer, F. Puente León und C. Frese.** *Automatische Sichtprüfung: Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung.* Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016.
- [8] **F. Blais und M. Rioux.** *Real-time numerical peak detector.* In: *Signal Processing* 11.2 (1986), S. 145–155.
- [9] **M. Breier, P. Möller, W. Li, M. Bosling, T. Pretz und D. Merhof.** *Accurate laser triangulation using a perpendicular camera setup to assess the height profile of PCBs.* In: *IEEE International Conference on Industrial Technology.* 2015, S. 1613–1618.
- [10] **G. Buchfink.** *Faszination Blech.* Hrsg. von **N. Leibinger-Kammüller.** Vogel Communications Group, 2005.
- [11] **E. Burke, R. Hellier, G. Kendall und G. Whitwell.** *A new bottom-left-fill heuristic algorithm for the two-dimensional irregular packing problem.* In: *Operations Research* 54.3 (2006), S. 587–601.

- [12] **B. Büttner und H.-M. Schmitt.** *Sichtweitensensor zur Optimierung der automatischen Lichtfunktionen im Automobil.* In: *Automobil-Sensorik 2.* Springer, 2018, S. 291–310.
- [13] **J. Canny.** *A computational approach to edge detection.* In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 6 (1986), S. 679–698.
- [14] **G. Cheng und J. Han.** *A survey on object detection in optical remote sensing images.* In: *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 117 (2016), S. 11–28.
- [15] **L. H. Cherri, A. C. Cherri und E. M. Soler.** *Mixed integer quadratically-constrained programming model to solve the irregular strip packing problem with continuous rotations.* In: *Journal of Global Optimization* 72.1 (2018), S. 89–107.
- [16] **L. H. Cherri, L. R. Mundim, M. Andretta, F. M. Toledo, J. F. Oliveira und M. A. Carravilla.** *Robust mixed-integer linear programming models for the irregular strip packing problem.* In: *European Journal of Operational Research* 253.3 (2016), S. 570–583.
- [17] **R. Dewil, P. Vansteenwegen und D. Cattrysse.** *Sheet metal laser cutting tool path generation: Dealing with overlooked problem aspects.* In: *Key Engineering Materials.* Bd. 639. 2015, S. 517–524.
- [18] **R. G. Dorsch, G. Häusler und J. M. Herrmann.** *Laser triangulation: Fundamental uncertainty in distance measurement.* In: *Applied Optics* 33.7 (1994), S. 1306–1314.
- [19] **D. H. Douglas und T. K. Peucker.** *Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature.* In: *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization* 10.2 (1973), S. 112–122.
- [20] **P. Du, W. A. Kibbe und S. M. Lin.** *Improved peak detection in mass spectrum by incorporating continuous wavelet transform-based pattern matching.* In: *Bioinformatics* 22.17 (2006), S. 2059–2065.
- [21] **H. Durrant-Whyte, D. Rye und E. Nebot.** *Localization of autonomous guided vehicles.* In: *Robotics Research.* Springer, 1996, S. 613–625.
- [22] **A. E. Eiben und J. E. Smith.** *Introduction to evolutionary computing.* Natural Computing Series. Berlin, Heidelberg: Springer, 2015.
- [23] **M. Endrizzi, B. Murat, P. Fromme und A. Olivo.** *Edge-illumination X-ray dark-field imaging for visualising defects in composite structures.* In: *Composite Structures* 134 (2015), S. 895–899.

- [24] **D. Erhan, C. Szegedy, A. Toshev und D. Anguelov.** *Scalable object detection using deep neural networks.* In: *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.* 2014, S. 2147–2154.
- [25] **E. Falkenauer.** *Genetic algorithms and grouping problems.* Chichester [u.a.]: Wiley, 1998.
- [26] **R. J. Fowler, M. S. Paterson und S. L. Tanimoto.** *Optimal packing and covering in the plane are NP-complete.* In: *Information Processing Letters* 12.3 (1981), S. 133–137.
- [27] **J. Fuchs.** *Verschnittoptimierung für zweidimensionale Prototypenfertigungsprozesse.* Masterarbeit, Karlsruher Institut für Technologie. 2015.
- [28] **R. C. Gonzalez und R. E. Woods.** *Digital image processing.* Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2017.
- [29] **C. Goulimis.** *Optimal solutions for the cutting stock problem.* In: *European Journal of Operational Research* 44.2 (1990), S. 197–208.
- [30] **R. Gruna und J. Beyerer.** *On scene-adapted illumination techniques for industrial inspection.* In: *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings.* 2010, S. 498–503.
- [31] **S. A. Gudmundsson, H. Aanæs und R. Larsen.** *Environmental effects on measurement uncertainties of time-of-flight cameras.* In: *International Symposium on Signals, Circuits and Systems.* Bd. 1. 2007, S. 1–4.
- [32] **C. A. Gueymard.** *Solar Radiation Spectrum.* In: *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology.* Hrsg. von **R. A. Meyers.** Springer New York, 2012, S. 9705–9730.
- [33] **C. Harris und M. Stephens.** *A combined corner and edge detector.* In: *Alvey Vision Conference.* Bd. 15. 50. 1988, S. 147–151.
- [34] **G. Häusler und S. Ettl.** *Limitations of optical 3D sensors.* In: *Optical Measurement of Surface Topography.* Springer, 2011, S. 23–48.
- [35] **K. He, G. Gkioxari, P. Dollár und R. Girshick.** *Mask r-cnn.* In: *IEEE International Conference on Computer Vision Proceedings.* 2017, S. 2961–2969.
- [36] **R. Heckmann und T. Lengauer.** *A simulated annealing approach to the nesting problem in the textile manufacturing industry.* In: *Annals of Operations Research* 57.1 (1995), S. 103–133.
- [37] **J. Heikkilä und O. Silven.** *A four-step camera calibration procedure with implicit image correction.* In: *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.* 1997, S. 1106–1112.

- [38] **J. W. Herrmann und D. R. Delalio.** *Algorithms for sheet metal nesting.* In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 17.2 (2001), S. 183–190.
- [39] **P. A. Hilton.** *The early days of laser cutting.* In: *11th Nordic Conference in Laser Processing of Materials.* 2007.
- [40] **T. Himeno und K. Nogi.** *Nesting data generation device and nesting data generation method.* Patent US 9,031,688. 2015.
- [41] **A. Hirsch.** *Werkzeugmaschinen: Anforderungen, Auslegung, Ausführungsbeispiele.* Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [42] **H. Hirschmuller.** *Stereo processing by semiglobal matching and mutual information.* In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 30.2 (2007), S. 328–341.
- [43] **J. Huber, C. Tammer, A. Kempter, C. Seidel und G. Reinhart.** *Optische Qualitätsprüfung von Batterieseparatoren.* In: *tm – Technisches Messen* 82.10 (2015), S. 495–505.
- [44] **H. Hügel und T. Graf.** *Laser in der Fertigung: Strahlquellen, Systeme, Fertigungsverfahren.* 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- [45] **C. J. Jacobus und R. T. Chien.** *Two new edge detectors.* In: *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 5 (1981), S. 581–592.
- [46] **B. Jähne.** *Digitale Bildverarbeitung und Bildgewinnung.* Springer Verlag, 2012.
- [47] **J. Kallrath, S. Rebennack, J. Kallrath und R. Kusche.** *Solving real-world cutting stock-problems in the paper industry: Mathematical approaches, experience and challenges.* In: *European Journal of Operational Research* 238.1 (2014), S. 374–389.
- [48] **G. Kendall.** *Applying meta-heuristic algorithms to the nesting problem utilising the no fit polygon.* Diss. University of Nottingham, 2000.
- [49] **T. Koch, M. Breier und W. Li.** *Heightmap generation for printed circuit boards (PCB) using laser triangulation for pre-processing optimization in industrial recycling applications.* In: *IEEE International Conference on Industrial Informatics.* 2013, S. 48–53.
- [50] **D. Kraft et al.** *A software package for sequential quadratic programming.* Techn. Ber. DFVLR-FB-88-28. DFVLR Oberpfaffenhofen, 1988.
- [51] **A. H. Land und A. G. Doig.** *An automatic method of solving discrete programming problems.* In: *Econometrica* 28.3 (1960), S. 497–520.
- [52] **R. Lange und P. Seitz.** *Solid-state time-of-flight range camera.* In: *IEEE Journal of Quantum Electronics* 37.3 (2001), S. 390–397.

- 
- [53] **U. Larsson, J. Forsberg und A. Wernersson.** *Mobile robot localization: Integrating measurements from a time-of-flight laser.* In: *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 43.3 (1996), S. 422–431.
- [54] **K. I. Laws.** *Texture energy measures.* In: *Proceedings of the Image Understanding Workshop.* 1979, S. 47–51.
- [55] **Y. LeCun, L. Bottou, Y. Bengio und P. Haffner.** *Gradient-based learning applied to document recognition.* In: *Proceedings of the IEEE* 86.11 (1998), S. 2278–2324.
- [56] **J. Levinson, J. Askeland, J. Becker, J. Dolson, D. Held, S. Kammel, J. Z. Kolter, D. Langer, O. Pink, V. Pratt et al.** *Towards fully autonomous driving: Systems and algorithms.* In: *IEEE Intelligent Vehicles Symposium.* 2011, S. 163–168.
- [57] **S. Z. Li, R. Chu, S. Liao und L. Zhang.** *Illumination invariant face recognition using near-infrared images.* In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 29.4 (2007), S. 627–639.
- [58] **R. Licari und E. L. Valvo.** *Optimal positioning of irregular shapes in stamping die strip.* In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 52.5-8 (2011), S. 497–505.
- [59] **D. G. Lowe.** *Object recognition from local scale-invariant features.* In: *Proceedings of the Conference on Computer Vision.* Bd. 2. 1999, S. 1150–1157.
- [60] **D. Marr und E. Hildreth.** *Theory of edge detection.* In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences* 207.1167 (1980), S. 187–217.
- [61] **D. Marr und T. Poggio.** *A computational theory of human stereo vision.* In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series B. Biological Sciences* 204.1156 (1979), S. 301–328.
- [62] **S. Martello, M. Monaci und D. Vigo.** *An exact approach to the strip-packing problem.* In: *INFORMS Journal on Computing* 15.3 (2003), S. 310–319.
- [63] **A. Mobasher und A. Ekici.** *Solution approaches for the cutting stock problem with setup cost.* In: *Computers & Operations Research* 40.1 (2013), S. 225–235.
- [64] **M. Mohammadikaji, S. Bergmann, S. Irgenfried, J. Beyerer, C. Dachsbacher und H. Wörn.** *A framework for uncertainty propagation in 3D shape measurement using laser triangulation.* In: *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings.* 2016, S. 1–6.
- [65] **I. Moring, T. Heikkinen, R. Myllyla und A. Kilpela.** *Acquisition of three-dimensional image data by a scanning laser range finder.* In: *Optical Engineering* 28.8 (1989), S. 288897.

- [66] **D. Naidu und R. B. Fisher.** *A comparative analysis of algorithms for determining the peak position of a stripe to sub-pixel accuracy.* In: *British Machine Vision Conference.* 1991, S. 217–225.
- [67] **T. J. Nye.** *Optimal nesting of irregular convex blanks in strips via an exact algorithm.* In: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 41.7 (2001), S. 991–1002.
- [68] **U. Ramer.** *An iterative procedure for the polygonal approximation of plane curves.* In: *Computer Graphics and Image Processing* 1.3 (1972), S. 244–256.
- [69] **B. G. Schwacha.** *Liquid cutting of hard materials.* Patent US 2,985,050A. 1958.
- [70] **D. Selzam.** *Entwurf von Maschinenfunktionen zur Minimierung der Stegbeschädigungen und des Verkippens von Schneidprodukten bei der Blechbearbeitung auf Laserflachbettmaschinen.* Masterarbeit, Universität Stuttgart. 2016.
- [71] **M. A. Shalaby und M. Kashkoush.** *A particle swarm optimization algorithm for a 2-D irregular strip packing problem.* In: *American Journal of Operations Research* 3.2 (2013), S. 268–278.
- [72] **L. Shapiro und G. Stockman.** *Computer vision.* Prentice Hall, New Jersey, 2001.
- [73] **J. Shi und C. Tomasi.** *Good features to track.* In: *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.* 1994, S. 593–600.
- [74] **K. Sörensen.** *Metaheuristics – the metaphor exposed.* In: *International Transactions in Operational Research* 22.1 (2015), S. 3–18.
- [75] **W. M. Steen und J. Mazumder.** *Laser material processing.* Springer science & business media, 2010.
- [76] **S. Suzuki und K. Abe.** *Topological structural analysis of digitized binary images by border following.* In: *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 30.1 (1985), S. 32–46.
- [77] **F. M. Toledo, M. A. Carravilla, C. Ribeiro, J. F. Oliveira und A. M. Gomes.** *The dotted-board model: A new MIP model for nesting irregular shapes.* In: *International Journal of Production Economics* 145.2 (2013), S. 478–487.
- [78] **R. Tsai.** *A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses.* In: *IEEE Journal on Robotics and Automation* 3.4 (1987), S. 323–344.
- [79] **D. J. Wales und J. P. Doye.** *Global optimization by basin-hopping and the lowest energy structures of Lennard-Jones clusters containing up to 110 atoms.* In: *The Journal of Physical Chemistry A* 101.28 (1997), S. 5111–5116.

- [80] **G. Wäscher.** *An LP-based approach to cutting stock problems with multiple objectives.* In: *European Journal of Operational Research* 44.2 (1990), S. 175–184.
- [81] **G. Wäscher, H. Haußner und H. Schumann.** *An improved typology of cutting and packing problems.* In: *European Journal of Operational Research* 183.3 (2007), S. 1109–1130.
- [82] **Z. Zhang.** *A flexible new technique for camera calibration.* In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 22.11 (2000), S. 1330–1334.
- [83] **M. Zimmermann, J. Otnad, M. Kiefer, A. S. Porth und L.-K. Raff.** *Verfahren zur trennenden Bearbeitung eines plattenförmigen Werkstücks mit Microjoints.* Patent DE 102012212566B4. 2012.
- [84] **M. Zuliani, C. Kenney und B. Manjunath.** *A mathematical comparison of point detectors.* In: *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.* 2004, S. 172–172.

## Eigene Veröffentlichungen

- [85] **F. Struckmeier.** *Nesting workpieces for cutting processes of a flatbed machine.* Patentantrag DE 102018124146A1, in Prüfung. 2020.
- [86] **F. Struckmeier, P. Blättner und F. Puente León.** *Methods for the localization of supporting slats of laser cutting machines in single images.* In: *Forum Bildverarbeitung.* 2020, S. 197–209.
- [87] **F. Struckmeier und F. Puente León.** *Nesting in the sheet metal industry: Dealing with constraints of flatbed laser-cutting machines.* In: *Procedia Manufacturing* 29 (2019). 18th International Conference on Sheet Metal, S. 575–582.
- [88] **F. Struckmeier und F. Puente León.** *Detektion der Auflagestege von Flachbett-Laserschneidmaschinen mittels Nahinfrarot-Beleuchtung.* In: *tm – Technisches Messen* 87.s1 (2020), S. 3–8.
- [89] **F. Struckmeier, J. Zhao und F. Puente León.** *Measuring the supporting slats of laser cutting machines using laser triangulation.* In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 108 (2020), S. 3819–3833.

## Betreute studentische Arbeiten

- [90] **P. Blättner.** *Methodenvergleich zur Objektdetektion im industriellen Umfeld.* Bachelorarbeit. Karlsruher Institut für Technologie, 2019.

- [91] **J. Hassler.** *Simulation of influencing factors for process-oriented nesting on flatbed laser-cutting machines.* Masterarbeit. Hochschule für Technik, Stuttgart, 2019.





# **Forschungsberichte aus der Industriellen Informationstechnik (ISSN 2190-6629)**

---

- Band 1 Pérez Grassi, Ana  
**Variable illumination and invariant features for detecting and classifying varnish defects.**  
ISBN 978-3-86644-537-6
- Band 2 Christ, Konrad  
**Kalibrierung von Magnet-Injektoren für Benzin-Direkteinspritzsysteme mittels Körperschall.**  
ISBN 978-3-86644-718-9
- Band 3 Sandmair, Andreas  
**Konzepte zur Trennung von Sprachsignalen in unterbestimmten Szenarien.**  
ISBN 978-3-86644-744-8
- Band 4 Bauer, Michael  
**Vergleich von Mehrträger-Übertragungsverfahren und Entwurfskriterien für neuartige Powerline-Kommunikationssysteme zur Realisierung von Smart Grids.**  
ISBN 978-3-86644-779-0
- Band 5 Kruse, Marco  
**Mehrobjekt-Zustandsschätzung mit verteilten Sensorträgern am Beispiel der Umfeldwahrnehmung im Straßenverkehr.**  
ISBN 978-3-86644-982-4
- Band 6 Dudeck, Sven  
**Kamerabasierte In-situ-Überwachung gepulster Laserschweißprozesse.**  
ISBN 978-3-7315-0019-3
- Band 7 Liu, Wenqing  
**Emulation of Narrowband Powerline Data Transmission Channels and Evaluation of PLC Systems.**  
ISBN 978-3-7315-0071-1

- Band 8 Otto, Carola  
**Fusion of Data from Heterogeneous Sensors with Distributed Fields of View and Situation Evaluation for Advanced Driver Assistance Systems.**  
ISBN 978-3-7315-0073-5
- Band 9 Wang, Limeng  
**Image Analysis and Evaluation of Cylinder Bore Surfaces in Micrographs.**  
ISBN 978-3-7315-0239-5
- Band 10 Michelsburg, Matthias  
**Materialklassifikation in optischen Inspektionssystemen mithilfe hyperspektraler Daten.**  
ISBN 978-3-7315-0273-9
- Band 11 Pallauf, Johannes  
**Objektsensitive Verfolgung und Klassifikation von Fußgängern mit verteilten Multi-Sensor-Trägern.**  
ISBN 978-3-7315-0529-7
- Band 12 Sigle, Martin  
**Robuste Schmalband-Powerline-Kommunikation für Niederspannungsverteilternetze.**  
ISBN 978-3-7315-0539-6
- Band 13 Opalko, Oliver  
**Powerline-Kommunikation für Batteriemangement-Systeme in Elektro- und Hybridfahrzeugen.**  
ISBN 978-3-7315-0647-8
- Band 14 Han, Bin  
**Characterization and Emulation of Low-Voltage Power Line Channels for Narrowband and Broadband Communication.**  
ISBN 978-3-7315-0654-6
- Band 15 Alonso, Damián Ezequiel  
**Wireless Data Transmission for the Battery Management System of Electric and Hybrid Vehicles.**  
ISBN 978-3-7315-0670-6

- Band 16 Hernández Mesa, Pilar  
**Design and analysis of a content-based image retrieval system.**  
ISBN 978-3-7315-0692-8
- Band 17 Suchanek, André  
**Energiemanagement-Strategien für batterieelektrische Fahrzeuge.**  
ISBN 978-3-7315-0773-4
- Band 18 Bauer, Sebastian  
**Hyperspectral Image Unmixing Incorporating Adjacency Information.**  
ISBN 978-3-7315-0788-8
- Band 19 Vater, Sebastian  
**Monokulare Blickrichtungsschätzung zur berührungslosen Mensch-Maschine-Interaktion.**  
ISBN 978-3-7315-0789-5
- Band 20 Back, Kristine  
**Erkennung menschlicher Aktivitäten durch Erfassung und Analyse von Bewegungstrajektorien.**  
ISBN 978-3-7315-0909-7
- Band 21 Nürnberg, Thomas  
**Entwurf von Computational-Imaging-Systemen am Beispiel der monokularen Tiefenschätzung.**  
ISBN 978-3-7315-0941-7
- Band 22 Kaiser, Cornelius  
**Adaptive Modulationsverfahren für die schmalbandige Powerline-Kommunikation in Niederspannungsnetzen.**  
ISBN 978-3-7315-1010-9
- Band 23 Struckmeier, Frederick  
**Prozesssicherheit von Laserschneidmaschinen – Auflagemessung und Schachtelung**  
ISBN 978-3-7315-1127-4

ISSN 2190-6629  
ISBN 978-3-7315-1127-4

Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISBN 978-3-7315-1127-4



9 783731 511274 >