



Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen  
der Technischen Universität München

# Inkrementelles Stauchen von Feinblechen zur automatisierten Fertigung dreidimensionaler Bauteile

## Zongru Yang

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der  
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)**

genehmigten Dissertation.

**Vorsitzender:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

**Prüfer der Dissertation:**

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann (i.R.)
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lohmann

Die Dissertation wurde am 11.06.2015 bei der Technischen Universität München  
eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 14.12.2015  
angenommen.

# Geleitwort

Die Kombination der ersten und der zweiten Verarbeitungsstufe stellt eine seltene Ausgangsposition für eine fachübergreifende Forschung in der deutschen Hochschullandschaft dar. Für die gestiegenen Anforderungen an Produkte und den verstärkten Kostendruck ist dieses Ineinandergreifen von Fertigungsverfahren ein idealer Nährboden für Forschungsaktivitäten, denn erst die gemeinsame Betrachtungsweise dieser beiden Verfahrensgebiete erlaubt Innovationen in vielen nachgeschalteten Bereichen der Industrie.

Vor allem Neuentwicklungen, aber auch die Weiterentwicklung bestehender Fertigungsverfahren, sollen im Umfeld eines härter werdenden Wettbewerbs dazu beitragen, die Position des Standortes Deutschland zu kräftigen. Das gegenseitige Befruchten von Theorie und Praxis durch die Zusammenarbeit von Hochschule und Industrie kann als Beitrag dafür angesehen werden.

Eine enge Anlehnung der Themen an die in der betrieblichen Praxis auftretenden Probleme als ein Bindeglied zwischen Grundlagenforschung und anwendungsorientierter Forschung liegt daher im Interesse dieser Berichte. Die einzelnen Arbeiten sind folglich als Bausteine zu betrachten, die einen entscheidenden Einfluss auf die Verbesserung bisheriger Technologien besitzen.

Neben den beiden großen fertigungstechnischen Schwerpunkten Urformtechnik und Umformtechnik, bei denen der isolierte Prozess im Mittelpunkt steht, gehört die gesamtheitliche Betrachtung der Verfahren mit naturwissenschaftlichen und planerischen Themen zum Inhalt der Arbeiten des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen.

Ergebnisse und Inhalte der Forschungsberichte sollen nicht als Einbahnstraße dem Wissenstransfer von Forschungsergebnissen in der Praxis dienen, sondern sie sollen neben der Basis für weiterführende Arbeiten auch als Diskussionsgrundlage für den Dialog zwischen Hochschule und Industrie angesehen werden.

Hartmut Hoffmann

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München.

Meinem Doktorvater, Herrn Prof. i.R. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann, gilt mein besonderer Dank für sein entgegengebrachtes Vertrauen und die Freiheit, die er mir durch die ganze Bearbeitungszeit zugestanden hat. Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Boris Lohmann, Ordinarius des Lehrstuhls für Regelungstechnik, und Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, Ordinarius des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Weiterhin danke ich den ehemaligen Kollegen des Lehrstuhls für die Unterstützung bei der Umsetzung dieses Forschungsvorhabens. Besonders bin ich Herrn Dr.-Ing. Roland Golle und Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Golle für ihre fachlichen Ratschläge und ihre Unterstützung zu Dank verpflichtet. Zum Gelingen des Forschungsvorhabens hat die Europäische Forschungsgesellschaft der Blechverarbeitung (EFB) finanzielle Unterstützung geleistet, auch dafür gilt mein Dank.

Ebenso danke ich meinen Kollegen Dr.-Ing. Franz Winkler und Dr.-Ing. Sebastian Bürger für das Korrekturlesen. Mein ganz besonderer Dank gebührt meiner Familie und im Besonderen meinen Eltern für ihre andauernde, bedingungslose Unterstützung und ihren Rückhalt.

München, im Mai 2015

Zongru Yang

## Resümee

Der steigende Bedarf an individuellen Blechformteilen erfordert flexible Fertigungsverfahren, die auch bei geringen Stückzahlen eine wirtschaftliche Fertigung ermöglichen. Im Vergleich zur Großserienfertigung kommen bei der Kleinserienfertigung hauptsächlich manuelle Verfahren zum Einsatz, die meist mit hohen Lohnkosten und schlechter Reproduzierbarkeit einhergehen. Das Kraftformerverfahren als traditionell handwerkliches Umformverfahren verwendet Universalwerkzeuge (z. B. Streck- und Stauchwerkzeuge), mit denen nahezu beliebige 2D- und 3D-Geometrien hergestellt werden können. Durch eine Automatisierung mit robotergestützter Bauteilführung eröffnen sich neue Potenziale. Im Bereich der 2D-Blechumformung wird durch eine modellfreie oder -basierte Regelung das Ziel „Autonomes Treiben“ erreicht. Da kein geeignetes Messsystem für die Erfassung der 2D-Bauteiloberfläche verfügbar ist, kann für die dreidimensionale Blechfertigung dieses 2D-Regelungsprinzip nicht angewendet werden. Die Idee vom modellfreien bzw. modellbasierten Ansatz wird jedoch trotzdem weiter entwickelt. Einerseits erfolgt eine Abspeicherung der Fertigungsstrategien im manuellen Umformprozess, die im Weiteren für die robotergestützte Fertigung übersetzt wird. Andererseits wird ein Approximationsmodell für die Umformung aufgestellt und anschließend durch Experimente verifiziert. Basierend auf dem Modell wird eine Fertigungsstrategie rechnerisch abgeleitet. Das somit automatisierte Kraftformerverfahren eignet sich jeweils für die Kleinserien- und Einzelteilerfertigung und reduziert die manuellen Wertschöpfungsanteile bei steigender Reproduzierbarkeit erheblich.

## Abstract

The growing demand for individualized sheet metal parts requires flexible manufacturing methods, which also enable cost-effective small batch production. Compared to large batch production, the manual methods are mainly utilized for small series and often lead to high labor costs and poor reproducibility. Driving traditionally as a manual sheet metal forming method uses universal tools (e.g. stretching and shrinking tools), which can generate almost any 2D and 3D geometries of metal parts. Enormous application potentials of this method are identified through automation of the process. In the field of the 2D forming process, the aim of „autonomous driving“ is achieved by the use of a model-free or -based closed loop control. But this control principle cannot be further applied to derive the production strategy for the 3D sheet metal forming, because there is no available measurement system for perception of the surfaces of the metal parts. However, the concept of the model-free and -based approaches is further developed. On the one hand, the production strategy is recorded in the manual forming process and then translated for the robot-assisted manufacturing. On the other hand, an approximated forming model is built and subsequently verified through experiments. A production strategy can be derived based on the model. The hereby automated driving method is suited for small batch and single part production respectively. It strongly reduces the manual value-added shares while increasing the reproducibility.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis der Kurzzeichen</b>	<b>III</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>5</b>
2.1 Umformmaschine: Kraftformer . . . . .	5
2.1.1 Stauch- und Streckwerkzeuge . . . . .	7
2.1.2 Umformkraft . . . . .	9
2.2 Umformen von L-förmigen Feinblechen . . . . .	12
2.3 Automatisierte inkrementelle Umformverfahren . . . . .	15
2.4 Weiterer Forschungsbedarf . . . . .	18
<b>3 Zielsetzung und Lösungsansatz</b>	<b>20</b>
<b>4 Versuchsanlagen, Messeinrichtungen und Softwaretools</b>	<b>23</b>
4.1 Fertigungseinheit . . . . .	23
4.1.1 Kraftformer . . . . .	23
4.1.2 Roboter . . . . .	24
4.1.3 Greifer . . . . .	27
4.2 Optisches Messsystem . . . . .	29
4.2.1 Trackingsystem . . . . .	29
4.2.2 GOM-Messsystem . . . . .	33
4.3 Softwaretools . . . . .	35
<b>5 Verfahrensentwicklung durch Kopieren des manuellen Stauchens</b>	<b>37</b>
5.1 Verfahrensbeschreibung . . . . .	37
5.1.1 Erfassung des manuellen Fertigungsprozesses . . . . .	38
5.1.2 Extrahieren der Umformtrajektorie . . . . .	41

---

5.1.3	Transformation der Bauteilbewegungen mittels der Roboter-Kamera-Kalibrierung . . . . .	42
5.1.4	Generierung der Steuerungsdaten zur automatisierten Fertigung . . . . .	45
5.2	Analyse des Kopierverfahrens . . . . .	47
5.2.1	Aufzeichnung der manuellen Bauteilführungen . . . . .	47
5.2.2	Ausführung der Roboter-Kamera-Kalibrierung . . . . .	50
5.2.3	Fertigungsgenauigkeit . . . . .	53
5.3	Schlussfolgerung . . . . .	56
<b>6</b>	<b>Verfahrensentwicklung durch Modellieren des manuellen Stauchens</b>	<b>58</b>
6.1	Verfahrensbeschreibung . . . . .	58
6.1.1	Modellierung des inkrementellen Stauchens . . . . .	59
6.1.2	Modellbasierte Optimierung der Prozessparameter . . . . .	68
6.1.3	Transformation der virtuellen Bauteilbewegungen in die reale Fertigungsumgebung . . . . .	73
6.1.4	Generierung der Steuerungsdaten zur automatisierten Fertigung . . . . .	78
6.2	Analyse des modellbasierten Verfahrens . . . . .	79
6.2.1	Verifikation des erstellten Stauchmodells . . . . .	79
6.2.2	Identifikation der Modellkennlinien . . . . .	85
6.2.3	Fertigungsgenauigkeit . . . . .	92
6.3	Schlussfolgerung . . . . .	95
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>96</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>100</b>
	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>106</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>107</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>112</b>
8.1	Ermittlung der Transformationsmatrix $Q$ . . . . .	112
8.2	Best-Fit-Funktion . . . . .	113

## Verzeichnis der Kurzzeichen

Zeichen	Einheit	Beschreibung der Größe
$a_{Ind.}, b_{Ind.}, c_{Ind.}$	$mm$	Dreieckseitenlänge
$A_{Ind.}, B_{Ind.}, \beta_{Ind.}$	$rad / ^\circ$	Drehwinkel um jeweilige Achse
$d_s$	$mm$	Schlagabstand
$d_w$	$mm$	Werkzeugdurchmesser
$e_{Ind.}$	–	Achsenvektor
$E$	$GPa$	E-Modul
$E_{Ind.}, \hat{E}_{Ind.}$	–	Achsenmatrix
$F_{Ind.}$	$N$	Kraft
$g$	–	Gemittelter Abstand zwischen zwei Punktwolken
$h_k, l_k, r_k$	$mm$	Höhe, Mantellinie, Radius eines geraden Kreiskegels
$h_s$	$mm$	Stößelverstellung
$H_{Ind.}, \tilde{H}_{Ind.}$	–	Homogene Matrix
$i, j, k$	–	Index
$L$ und $L_G$	$mm$	Länge
$n, n_{Ind.}$	–	Anzahl
$\mathbf{n}$	–	Normalenvektor
$N$	–	Anzahl
$\mathcal{N}$	–	Operator der Normierung
$\mathbf{p}_{Ind.}$	–	Punkt
$Q$	–	Transformationsmatrix
$r_{Ind.}$	$mm$	Komponente der Rotationsmatrix
$R_{Ind.}$	–	Rotationsmatrix
$\mathbf{s}, \mathbf{s}_{Ind.}$	–	Schlagparametersatz
$S, S_{Ind.}$	–	Schlagfolge
$\mathcal{S}, \mathcal{S}^{Ind.}$	–	Population



<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung der Größe</b>
$t_{Ind.}, t_{Ind.}^*$	<i>ms</i>	Zeit
$\mathbf{t}_{Ind.}$	–	Verschiebungsvektor
$u_s$	<i>mm</i>	Werkzeugüberdeckung
$W$ und $W_G$	<i>mm</i>	Breite
$x_i, y_i, z_i$	<i>mm</i>	Koordinaten
$X, Y, Z$	- / <i>mm</i>	Achsenbezeichnung / Verschiebung entlang der Achse
$\alpha, \beta, \gamma, \phi, \theta$	<i>rad / °</i>	Winkel
$\chi_i$	–	Vektor
$\delta$	<i>mm</i>	Stauchung
$\Delta V, \Delta X, \Delta Y, \Delta Z$	<i>mm</i>	Streuungsmaße in Verschiebung
$\Delta D, \Delta A, \Delta B, \Delta C$	°	Streuungsmaße in Drehung
$\eta_{Ind.}$	–	Abstand
$\mu$	–	Reibungskoeffizient
$\nu$	–	Poissonzahl
$\rho$	<i>g/cm<sup>3</sup></i>	Dichte
$\rho_i$	–	Vektor
$\rho_l$	–	Verhältnis der Länge
$\rho_o, \rho_r, \rho_m$	–	Quoten
BKS	–	Basis-Koordinatensystem
CKS	–	Kamera-Koordinatensystem
FEM	–	Finite-Elemente-Methode
GA	–	Genetische Algorithmen
GKS	–	Greifer-Koordinatensystem
KKS	–	Kraftformer-Koordinatensystem
MKS	–	Marker-Koordinatensystem
RKS	–	Roboter-Koordinatensystem
RMS	–	„Root Mean Square“

## 1 Einleitung

Im Bereich der Kleinserien- und Einzelteilerfertigung finden inkrementelle Umformverfahren heutzutage ein breites Anwendungsgebiet. Inkrementelle Umformverfahren zeichnen sich durch eine von Werkzeuggeometrien und Matrizen unabhängige Endgeometrie aus. Die hierdurch entstehende große Formflexibilität ist das Produkt vieler lokaler Umformungen mittels geometrisch einfacher Werkzeuge.

Bereits die alten Ägypter beherrschten das Prinzip des inkrementellen Formens von dreidimensionalen Geometrien aus flachen Blechbauteilen. Anfangs war die Menschheit nur in der Lage, relativ weiche Materialien zu bearbeiten. Hierbei wurde durch wiederholtes Schlagen mit einem Hammer auf das flache Blech die Endgeometrie erreicht. Die Umformung erfolgte ohne zusätzliche Erwärmung des Materials. Dieses Verfahren wird als *Treiben* bezeichnet. Bis ins Mittelalter fand diese Formgebung im kalten Zustand einen großen Markt im Bereich der Schmuck- und Rüstungsproduktion. So ließen etwa Könige und Herrscher mittels dieses Verfahrens Masken und Rüstungen anfertigen (siehe Abbildung 1.1).

Um die gewünschte Endgeometrie aus dem flachen Blech zu fertigen, wurde dem Werker großes Geschick und Können abverlangt, da die Positionierung des Bauteils sowie das Bearbeiten des Bleches mit einem Hammer ausschließlich durch den Werker erfolgt. Falsch positionierte Hammerschläge sind wegen der damit verbundenen Verfestigung nur schwer wieder zu korrigieren, wodurch eine Realisierung der gewünschten Endgeometrie nicht mehr erfolgen kann.

Erst im letzten Jahrhundert wurde das inkrementelle Umformverfahren *Treiben* auch im industriellen Maßstab eingesetzt, und zwar zunächst beim Bau der ersten Ganzmetallflugzeuge (siehe Abbildung 1.2).



*Abbildung 1.1: Brustschild einer Ritterrüstung.*



*Abbildung 1.2: Erstes Ganzmetallflugzeug.*

---

Die dabei verwendeten Vorrichtungen wurden von Walter Eckold erfunden [Eckold2011], der dann 1936 die Treibmaschine (den sogenannten Eckold-Kraftformer) in den Markt einfuhrte. Der Kraftformer stellt heute noch eine einzigartige Maschine zur spanlosen Kaltumformung von Blechen und Profilen dar, deren gewünschte zwei- oder dreidimensionale Geometrien mithilfe eines allgemeinen Werkzeugsatzes generiert werden können. Daher verbreitet sich der Kraftformer in Bereichen des Flugzeug- und Schiffbaus, bei der Herstellung von Verkleidungen von Schienenfahrzeugen oder in Handwerksbetrieben zur Fertigung von Oldtimerkarosserien und ganz allgemein in allen Bereichen des Prototypenbaus und der Einzelteulfertigung (siehe Abbildung 2.3).

Die meisten inkrementellen Umformverfahren bieten eine Reihe von Vorteilen gegenüber herkömmlichen Verfahren (z. B. Tiefziehen):

- Flexibilität: Die Umformung findet mit Universalwerkzeugen statt, was zu einer großen Flexibilität der gewünschten Endgeometrie führt.
- Werkstoffeigenschaften: Die Formgebung führt zu einem Anstieg der Festigkeit des metallischen Werkstoffs.
- Kosten: Die einfachen Maschinen und Werkzeuge für inkrementelle Umformverfahren sind kostengünstiger als bei den meisten anderen Umformverfahren (z. B. Tiefziehen).

Allerdings gibt es auch eine Reihe von Nachteilen, die bisher zum Scheitern einer größeren industriellen Nutzung führen:

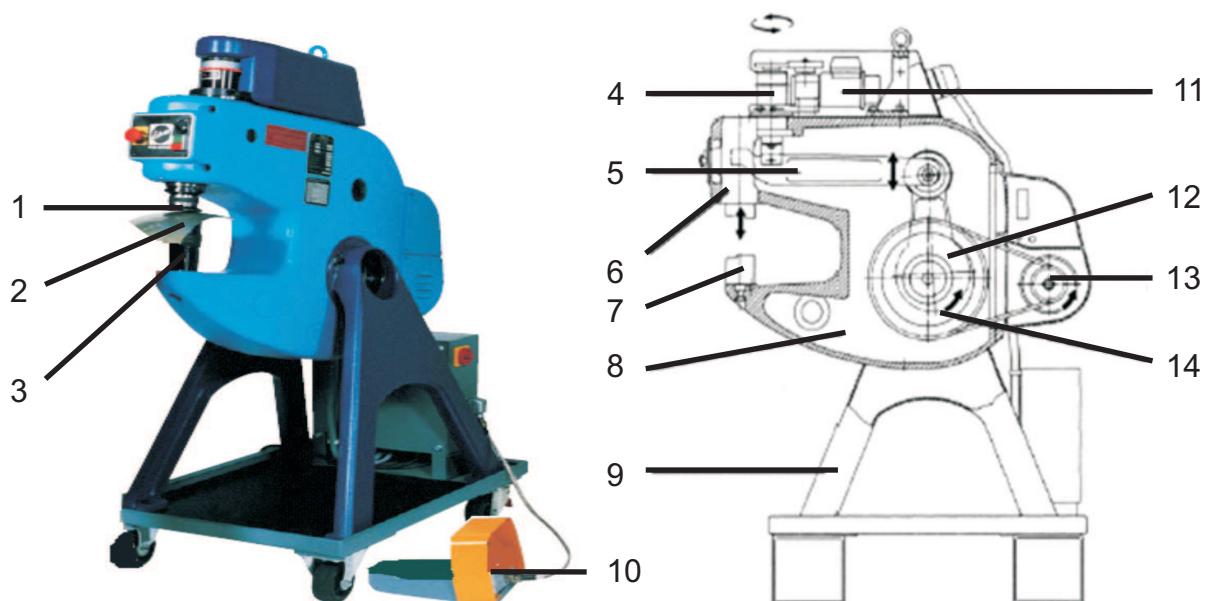
- Arbeitsintensive Fertigung: Die vielen kleinen Umformschritte benötigen ein Vielfaches mehr an Zeit als konventionelle Prozesse mit formgebundenen Werkzeugen (z. B. Tiefziehen). Hinzu kommt der ständige Vergleich zwischen Modell und Bauteil, welcher vom Werker manuell durchgeführt werden muss.
- Reproduzierbarkeit: Die Positionierung sowie Endgeometrie des Bauteils ist ausschließlich vom manuellen Geschick des Werkers abhängig, was bei den meisten Prozessen eine unzureichende Kontrolle darstellt und eine Reproduzierbarkeit nur schwer ermöglicht. [Hirt2004]

Deshalb ist aus Kosten- und Qualitätssicht ein wirtschaftlicher Einsatz des inkrementellen Umformverfahrens in der Fertigung kleiner und mittlerer Stückzahlen ohne Automatisierung nicht denkbar. Die vorliegende Arbeit soll dazu beitragen, das traditionelle *Kraftformerverfahren* mittels innovativer Robotertechnik und rechnergestützter Methoden zu automatisieren, um daraus ein größeres Anwendungspotenzial im Bereich der Kleinserien- und Einzelteilerfertigung zu eröffnen.

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

### 2.1 Umformmaschine: Kraftformer

Die Umformmaschine Kraftformer besteht aus einer mechanischen C-Gestell-Pressen. Der Aufbau der Maschine ist in Abbildung 2.1 dargestellt.



1 Oberes Werkzeug

6 Stößel

11 Getriebemotor

2 Zu bearbeitendes Blech

7 Werkzeugaufnahme

12 Pleuel auf Exzenter

3 Unteres Werkzeug

8 Pressenrahmen

13 Elektromotor

4 Verstellspindel

9 Gestell

14 Schwungscheibe

5 Druckhebel

10 Fußpedal

Abbildung 2.1: Kraftformer und Konstruktionsdarstellung des Typs KF 330 „Piccolo“ [Eckold2001].

Das Oberwerkzeug ist an einem Stößel befestigt. Der Druckhebel überträgt die Bewegung des Pleuels auf den Stößel. Der Pleuel wird von der Schwungscheibe bewegt,

welche wiederum über den Elektromotor angetrieben wird. Zwischen Elektromotor und Schwungscheibe sorgt ein Keilriemen für eine optimale Kraftübertragung.

Das Oberwerkzeug bewegt sich mit konstanter Hubzahl in vertikaler Richtung [Eckold 2001]. Zwischen Unter- und Oberwerkzeug positioniert der Werker das Blech, welches sich beim Kontakt mit den Werkzeugen zuerst elastisch verformt. Bei weiterem Kraftanstieg wird der Bereich des Blechs, der im direkten Kontakt mit den Werkzeugen steht, plastifiziert. Die Umformung erfolgt ausschließlich lokal über einen kleinflächigen Bereich des Blechs. Eine großflächige Umformung wird durch horizontales Verschieben des Bauteils nach jedem lokalen Umformschritt erreicht.

Um die Größenunterschiede der Werkzeuge auszugleichen, die Prozesskraft zu verändern und das Wechseln der Werkstücke zu erleichtern, kann eine Höhenverstellung des Stößels mittels Verstellspindel durchgeführt werden. Das Fußpedal steuert hierzu den Getriebemotor, welcher mit der Verstellspindel verbunden ist und die Informationen vom Fußpedal auf die Verstellspindel überträgt. Der maximale Verstellbereich der Spindel beträgt 30 mm. Das Oberwerkzeug befindet sich im Ausgangszustand in der Referenzposition, dem maximalen Abstand zum Unterwerkzeug. Ausgehend von der Referenzposition wird der zurückgelegte Weg des Oberwerkzeugs in der vertikalen Richtung als *Zustellung* definiert und kann im Dauerhub-Modus über das Fußpedal eingestellt werden. Darüber erfolgt im Wesentlichen die Regulierung der Kraft, welche auf das Blech wirkt.

Ein weiterer Parameter zur Einstellung der erforderlichen Umformung des Bleches ist die Stößelverstellung, also der zurückgelegte Weg des Oberwerkzeugs während der Schlagoperation. Dieser Parameter kann im Einzelhub-Modus sowohl am Bedienpanel als auch am Steuerrechner vorgegeben werden. Im Unterschied zum Dauerhub wird der Einzelhub meist zur Nachbearbeitung für nur wenige, einzelne Umformvorgänge genutzt und ist zeitlich aufwendiger als der Dauerhub, der meist zur groben Formgebung dient. Beim Einzelhub wird bei einer Initialisierung oder Änderung der Zustellung das Oberwerkzeug zur Referenzposition neu ausgerichtet, was etwa 16 Sekunden in

Anspruch nimmt. Durch die Zustellung per Fußpedal beim Dauerhub entfällt hierbei dieser Zeitverlust. Des Weiteren ist bei der Einstellung der Maschine zu berücksichtigen, dass die Umformkraft durch die Zustellung und Stößelverstellung gemeinsam bestimmt wird, da eine große Zustellung bzw. Stößelverstellung zu einem geringeren Abstand zwischen den Werkzeugen führt und somit beim Aufeinandertreffen durch den Kontakt eine höhere Kraft übertragen wird.

Der Kraftformer erleichtert dem Werker eine Fertigung von Blechteilen mit hoher Festigkeit. Er erlaubt es, dass zur Fertigung von Blechteilen mit komplexer Geometrie verschiedene inkrementelle Umformungen mittels des Universalwerkzeugsatzes kombiniert werden. Allerdings bleibt dieses Umformverfahren weiterhin handwerklich. Die Blechteile müssen vom Werker im Werkzeug positioniert werden. Die Fertigung ist sehr zeitaufwendig und die Fertigungsqualität hängt sehr stark vom Geschick und Können des Werkers ab.

### **2.1.1 Stauch- und Streckwerkzeuge**

Obwohl der Kraftformer über eine breite Palette von Werkzeugen wie z. B. für das Glätten, das Nachformen und das Richten verfügt, sind die zwei Haupteinsatzgebiete des Kraftformers das Stauchen und Strecken. Beim Stauchen bestehen Ober- und Unterwerkzeug aus jeweils zwei halbrunden rauen Backen. Wird der Kraftformer betrieben, so werden die Backen von Unter- und Oberwerkzeug vertikal gegeneinandergedrückt. Hierbei können die Backen aufgrund einer parallelogrammförmigen Hebelkonstruktion die Kraft horizontal übertragen (siehe Abbildung 2.2 links). Da im Prozessablauf das Blechbauteil zwischen Ober- und Unterwerkzeug positioniert ist, muss dieses der Bewegung der Backen folgen und wird dadurch gestaucht oder gestreckt. Im Unterschied zum Stauchen findet hier die horizontale Bewegung der zwei Backen nicht zueinander, sondern durch die parallelogrammförmigen Hebel in entgegengesetzter Richtung auseinander statt. Das eingespannte Blech wird von den Backen bei jedem Schlag wie beim Stauchen zuerst festgehalten und bei weiterer Kraftbelastung durch die Bewegung der Backen gestreckt (siehe Abbildung 2.2 rechts).



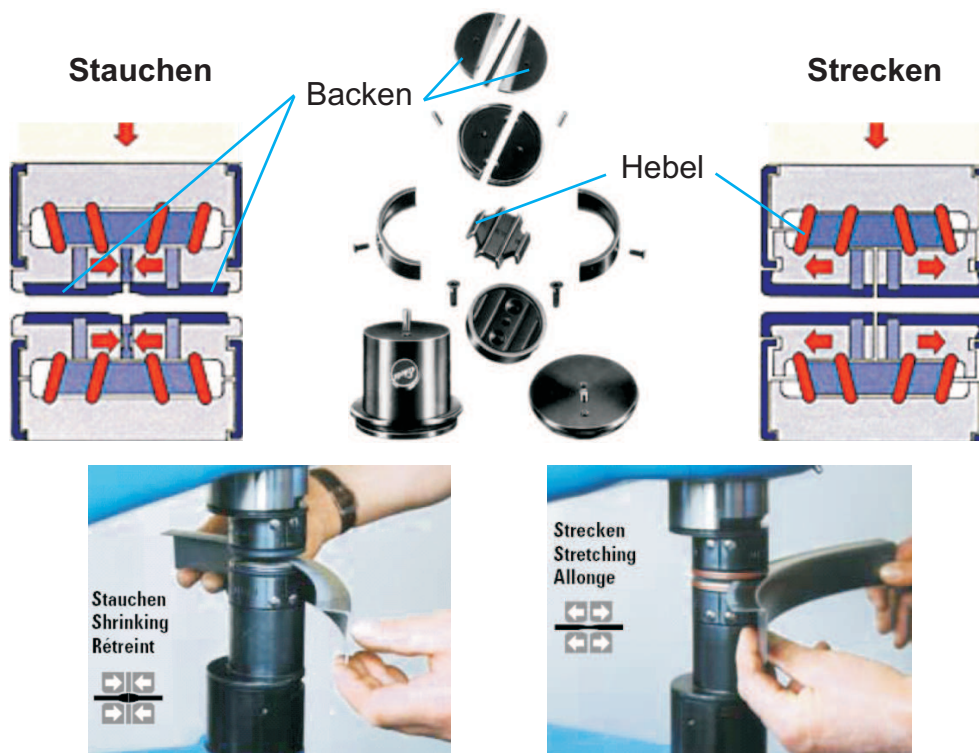
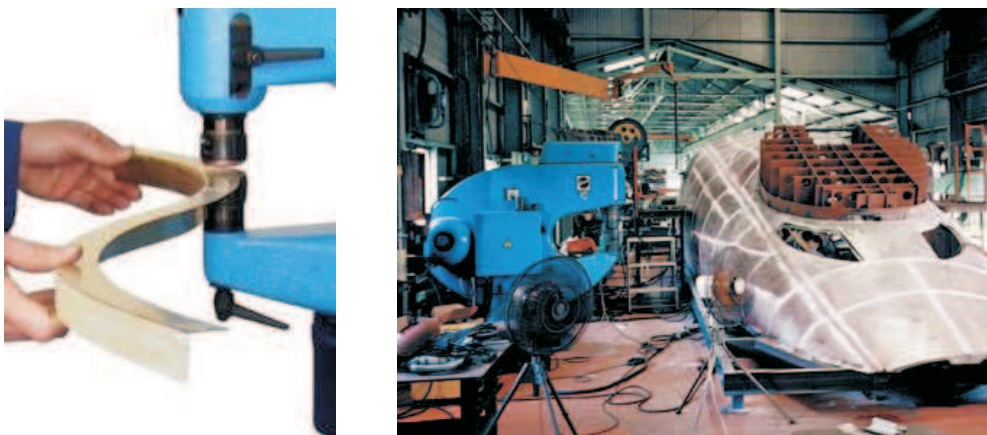


Abbildung 2.2: Stauch- und Streckwerkzeuge mit ihren Funktionen. Das Prinzip ist die Umlenkung der vertikalen Kraft durch die Hebel (rote Elemente) in die horizontale Richtung, damit die Backen horizontal zueinander (Stauchung) oder auseinander (Strecken) bewegt werden [Eckold2003].

Jedes Werkzeug ist in großer und kleiner Geometrie vorhanden, um dem Werker mit seinen unterschiedlich großen Blechbauteilen gerecht zu werden. Mit den kleineren Werkzeugen sind die Umformungen flächenmäßig lokalisierter. Hierbei muss der Werker großes Geschick bzw. Erfahrung mit Halten und Positionieren des Bleches haben, da sich durch unbedachtes Hämmern das Blechmaterial unter Umständen verfestigt und somit anschließend nicht weiter umformbar ist oder sogar reißt. Die Grenze der Umformbarkeit von Blechen wird beim Kraftformerverfahren hauptsächlich durch die Blechdicke und die Bauteilfläche bestimmt. Blechlänge und -breite sind wegen der lokalen Umformung nicht dominant, weil nach jedem Umformschritt das Blech wieder neu positioniert wird. Da die Umformarbeit durch die Werkzeuge oberflächennah eingebracht wird, ist die Blechdicke von entscheidender Bedeutung. Eine zu große Blechdicke führt durch

das Pressen der Backen zu keiner oder nur unzureichenden Umformung in der mittleren Blechschicht, wodurch die gewünschte Geometrie nicht gefertigt werden kann. Allerdings ist die maximal umformbare Blechdicke von der Festigkeit des Materials abhängig [Eckold2003].

Mittels Stauch-/Streckwerkzeug können Feinbleche mit L-Profil in eine splineförmige 2D-Geometrie und ebene Bleche in eine konkav/konvex gekrümmte 3D-Oberfläche umgeformt werden. Dies entspricht den Anwendungsfällen zur Herstellung von Buchstabenumrandungen beleuchteter Schriften und von Verkleidungsteilen beim Schiff- und Schienenfahrzeugbau (siehe Abbildung 2.3).



*Abbildung 2.3: Links: Umformung mittels Stauch-/Streckwerkzeug: Feinblech mit L-Profil in S-Form (links). Rechts: einfach bzw. doppelt gekrümmte Verkleidungsblechteile im Schienenfahrzeugbau [Eckold2011].*

### **2.1.2 Umformkraft**

Die hierzu nötige Umformkraft ist die Kraft, die unmittelbar auf das Blech wirkt und zur Verformung führt. Diese Kraft wird durch das Stauch- und Streckwerkzeug erzeugt. Jedes Werkzeug besitzt einen sich bewegenden (oben) und einen festen (unten) Teil. Wie Abbildung 2.2 zeigt, fährt das obere Werkzeug herunter zum unteren Teil und drückt das Blech dazwischen zusammen. Die auf die Bleche aufgebraachte, vertikale Kraft  $F_v$

wird durch schräge Anschlagenelemente (rot) in beiden Werkzeugteilen in horizontale Richtung übertragen (siehe Abbildung 2.4 (b)). Dadurch wird die horizontale Kraft  $F_h$  erzeugt. Zwischen den beiden Kräften gibt es folgende Beziehung  $F_h = F_v / \tan(\alpha)$ , wobei  $\alpha$  den Übertragungswinkel des Hebels bezeichnet. Im Umformvorgang verkleinert sich der Winkel  $\alpha$  nach der horizontalen Bewegung der Werkzeugbacken. Damit steigt die horizontale Kraft  $F_h$ , auch wenn die vertikale Kraft  $F_v$  unverändert bleibt. Die Reibungskraft  $F_r$  wird durch das Kontaktieren zwischen Backen und Blech erzeugt. Eine Haftreibung tritt anfangs auf und bleibt bestehen, solange  $F_h \leq F_{rmax}$  ist. Nachdem die Backen durch eine größere Kraft  $F_h$  auf dem Blech zum Gleiten übergehen, wird die Reibungskraft  $F_r$  nach dem Coulomb'schen Gesetz  $F_r = \mu \cdot F_n$  ermittelt. Dabei bezeichnet  $\mu$  den Gleitreibungskoeffizienten. Da das Werkzeug eine raue Oberfläche hat, sind die Reibungszustände im Umformprozess sehr komplex und daher variiert  $\mu$  nach jedem Schlag.

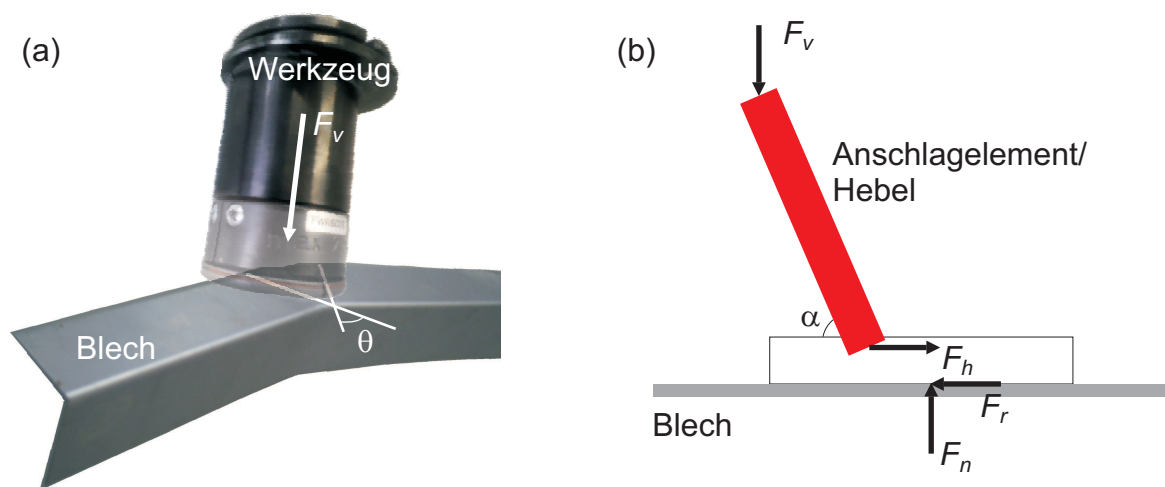


Abbildung 2.4: (a) Gestreckter L-förmiger Blechwinkel mit dem Umformwinkel  $\theta$ ; (b) Kraftübertragung vom Werkzeug zum Blech. ( $F_v$ : vertikale Kraft;  $F_h$ : horizontale Kraft;  $F_r$ : Reibkraft;  $F_n$ : Normalkraft;  $\alpha$ : Übertragungswinkel.)

Die vertikale Kraft  $F_v$  kann bei einer Schlagposition auf einem Blech mittels einer Ladezelle vermessen werden. Bei einem Schlag steigt sie mit der Werkzeugbewegung,

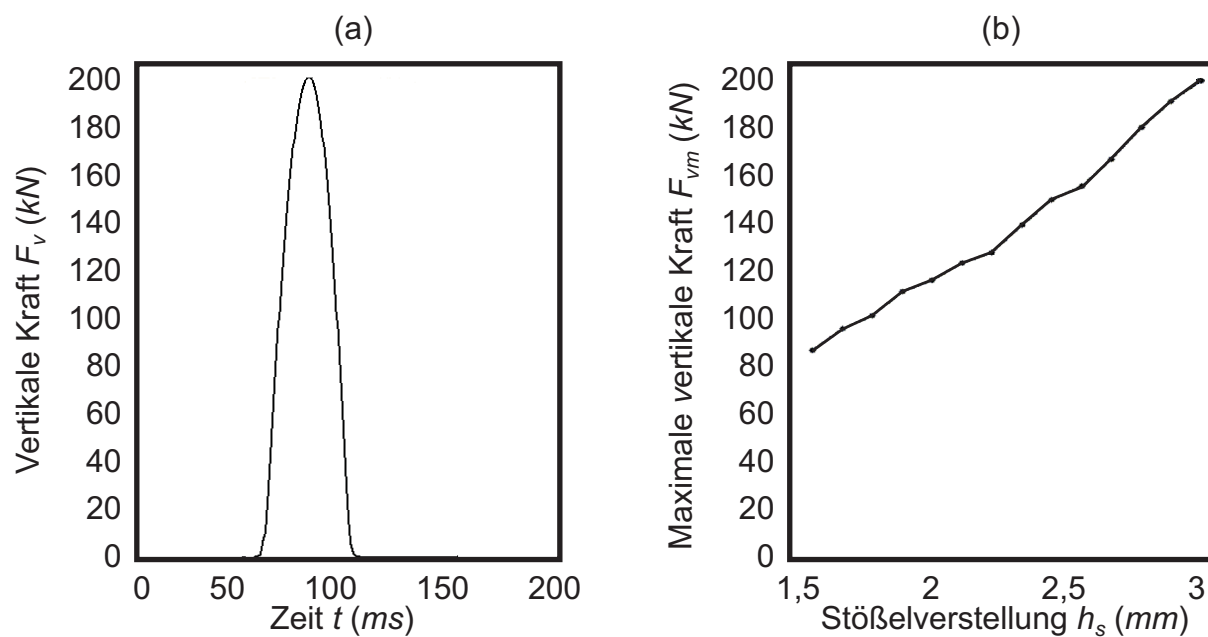


Abbildung 2.5: Links: Vermessung der vertikalen Kraft  $F_v$  entlang der Zeit  $t$  beim Stau-schen mit einer Stößelverstellung von 3 mm. Rechts: Beziehung zwischen der maximalen vertikalen Kraft  $F_{vm}$  und der Stößelverstellung  $h_s$ . (Versuchsblech mit dem Werkstoff DC04 und einer Dicke von 1 mm; Zustellung = 22 mm)

bis der maximale Wert erreicht wird, und fällt anschließend bis auf null ab (siehe Abbildung 2.5 (a)). Zu jeder Messung von  $F_v$  wird ein neues Versuchsblech mit dem Werkstoff DC04 und einer Dicke von 1 mm verwendet. Die Messungen zeigen eine gewisse Beziehung zwischen den maximalen Werten der vertikalen Kraft  $F_v$  und den Stößelverstellungen  $h_s$  (siehe Abbildung 2.5 (b)). Wie im letzten Abschnitt erwähnt, bedeutet die Stößelverstellung eine spezifisch auf den Kraftformer bezogene, numerisch gesteuerte Schlagstärke, die über eine externe Steuerung des Kraftformers angegeben wird.

Wie erwähnt, wird die Übertragung der vertikalen Kraft  $F_v$  in die horizontale Richtung durch eine parallelogrammförmige Hebelkonstruktion realisiert. Der Innenwinkel  $\alpha$  des Parallelogramms ändert sich, sobald die Werkzeugbacken in der horizontalen Richtung bewegt werden. Dadurch ist das Verhältnis der Kraftübertragung in einem neuen Zustand. Da bis jetzt der Winkel noch nicht messbar ist, kann während des Umformvorgangs die horizontale Kraft  $F_h$  durch die gemessene Kraft  $F_v$  nicht berechnet und eben-

so die durch  $F_h$  verursachte Reibungskraft nicht ermittelt werden. Dies erschwert eine genaue Untersuchung der Spannungs-, Dehnungs- und Reibungszustände des Blechs.

## 2.2 Umformen von L-förmigen Feinblechen

In jüngerer Zeit wird eine Tendenz zur hohen Individualisierung von Produkten erkennbar [Tseng2003]. Bei der Umformung von Blechen erfüllt das *Kraftformerverfahren* die benötigte Flexibilität im Vergleich zur Massenproduktion in Presswerken. Da das weiter entwickelte Treibverfahren immer noch auf Handarbeit beruht, ist aus Kosten- und Qualitätsgründen zur Verringerung des manuellen Aufwands eine Automatisierung dieses Fertigungsprozesses nötig.

Abbildung 2.3 zeigt, dass bei der Herstellung von Leuchtschriften die Feinbleche mit L-Profilen in eine beliebige zweidimensionale Geometrie inkrementell gestaucht und/oder gestreckt werden können. Um die Fertigungszeit zu reduzieren und die Bauteilqualität unabhängig vom Werker zu machen, wurde am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München das automatisierte Stauchen und Strecken der L-förmigen Feinbleche erforscht. (Ein solches L-förmiges Blech besteht aus zwei Schenkeln mit einem radialen Übergang und wird zuvor an einer Abkantmaschine gefertigt (siehe Abbildung 2.4 (a)).)

Als grundlegende Forschung fängt die Arbeit von [Hautmann2009] mit der FE-Modellierung des Einzelschlages an. Zum FEM-Simulieren der Umformung wurden die Materialkennwerte, z. B. die Spannung-Dehnungskurve und der Reibkoeffizient zwischen Blech und Werkzeug benötigt. Der Reibkoeffizient bestimmt die Ziehkraft in der horizontalen Richtung, die über die Umformgröße entscheidet. Dieser Parameter kann wegen der rauen Werkzeugoberflächenstruktur nicht vermessen, sondern durch einen Vergleich zwischen virtueller und realer Umformung ermittelt werden. Für eine Umformung mit mehreren Schlägen wurden die Fließgrenze des Bleches und die Rauigkeit der Blechoberfläche in Beziehung zur Anzahl der ausgelösten Schläge empirisch bestimmt. Darauf basierend wurde ein invertiertes Modell zum Ermitteln der Prozessparameter unter

der Vorgabe einer gewünschten Geometrie des Bleches entwickelt. Insgesamt zeigt diese Arbeit einen FEM-basierten Lösungsweg zur Automatisierung der Umformung von L-förmigen Feiblechen. Der Autor hat zum Schluss der Arbeit darauf hingedeutet, dass für die Automatisierung eine signifikante Reduzierung des Rechenaufwandes durch eine neue Modellierung des Umformprozesses, eine Adaption der FE-Netze und einen Aufbau einer Datenbank bzw. eines Expertensystems erzielt werden kann.

Im Vergleich zur mechanischen Analyse fand in dem Beitrag [Scherer2010] die Entwicklung einer Messtechnik zum Aufbau eines Assistenzsystems für den Werker statt. Während der Blechfertigung erfasste ein markerbasiertes Stereokamerasystem die Geometrie des L-förmigen Bleches und bot dem Werker immer die aktuelle Blechgeometrie an. Mit einer virtuellen Schablone wurden die Geometrieabweichungen farbig auf einem Bildschirm angezeigt. Somit weiß der Werker sofort, wo das Blech noch bearbeitet werden muss und wann das Blech in die Zielgeometrie umgeformt wird.

Anschließend wurde zum Aufbau eines Regelkreises das Feedbacksignal des optischen Sensors benutzt [Yang2008]. Der Regler rechnet die lokale Geometrieabweichung in die Stößelverstellung bzw. -kraft um, mit der die Schläge automatisch ausgelöst werden. Mit dem geschlossenen Regelkreis wurde erreicht, dass der Werker nur das Blech in der Hand festhalten und im Werkzeug hin und her bewegen muss. Sobald das Blech die Zielgeometrie erreicht, hören die Schläge sofort auf.

Zweihändiges Blechgreifen bzw. -führen konnte unter Verwendung eines 6-achsigen KUKA-Roboters ersetzt werden. In [Golle2007] wurde diese Technik zur automatischen Handhabung umzuformender L-förmiger Bleche dargestellt. Dabei wurde die Blechfertigung nur mit vordefinierten Prozessparametern gesteuert und daher war es noch nicht möglich, ein Blech durch diese Prozessautomation in eine gewünschte Geometrie umzuformen.

[Yang2007] fasste die Aspekte der Mess- und Regelungstechnik sowie der Roboter-technik zusammen und erreichte eine Vollautomatisierung der Blechfertigung von L-

förmigen Feinblechen mittels Stauch- und Streckwerkzeug. In der Arbeit wurde zur Umrechnung der Geometrieabweichung in die Stößelverstellung bzw. -kraft ein Fuzzy-Regler verwendet. Die Fuzzy-Regelung ist dem menschlichen Verhalten ähnlich und kann daher zeitnah mit geringem Aufwand implementiert werden. Sie beschreibt jedoch keinen Vorgang der Blechumformung und hängt vom Vorwissen des Werkers ab.

Eine alternative Regelung befindet sich in [Yang2009a] und [Yang2009b]. Basierend auf der Arbeit von [Hautmann2009] wurde zuerst der Streckvorgang des L-förmigen Bleches betrachtet, wobei sich drei Phasen *kombinierte Deformationen*, *Materialfluss* sowie *Rückfederung und -biegung* in einer Streckoperation darstellten. Das erhaltene Zustandsraummodell repräsentiert ein nichtlineares, zeitdiskretes SISO-System („Single-Input and Single-Output“) mit Beschränkungen der Stell- und Ausgangsgrößen (nämlich Stößelverstellung und lokale Geometrieabweichung). Zur Ermittlung optimaler Stellgrößen wurde eine modellprädiktive Regelung gewählt und zur Lösung des Optimierungsproblems die Diskrete Dynamische Programmierung (DDP) herangezogen. Auf Basis der Simulationsergebnisse wurde zur Durchführung eines Laborexperiments ein Parametersatz ausgewählt und in der DDP verwendet. Das Ergebnis zeigte, dass unter den optimalen Stellgrößen die gewünschte Geometrie recht gut erreicht wurde.

[Scherer2013] hat den Forschungsschwerpunkt auf die automatisierte Herstellung von L-Blechen mit kreisförmiger Geometrie gelegt. Durch eine statistische Versuchsplanung wurde die Korrelation zwischen Prozess- und Werkstückparametern untersucht. Daraus ergab sich ein empirisches Stauch- bzw. Streckmodell, das die Beziehung zwischen dem Endradius und der Schlagstärke beschreibt. In diesem Modell bestand jedoch kein Parameter für die Wechselwirkung zwischen nacheinander ausgelösten Schlägen, so dass keine hohe Fertigungsgenauigkeit erzielt werden konnte. Durch das Einführen der *Schlagdichte* wurde ein weiteres Umformmodell aus einer Regressionsanalyse der Versuchsergebnisse aufgestellt. Das erweiterte Modell bot für einen gegebenen Zielradius mehrere Parametersätze an, mit denen ein Blech noch nicht in die Zielgeometrie umgeformt werden konnte. Eine anschließende Optimierung erfolgte durch eine iterative Anpassung der Schlagdichte. Somit wurde der Zielradius wesentlich genauer erreicht.

Als Fazit wurde festgestellt, dass eine Vollautomatisierung der Fertigung von L-förmigen Feiblechen durch eine Einsatzkombination von Mess-, Steuerungs- und Regelungs- sowie Robotertechnik erfolgen sollte. Es ergaben sich unterschiedliche Modellierungen des inkrementellen Umformprozesses und mehrere Steuerungs- und Regelungsprinzipien. Der Automatisierungsgrad wurde von dem Assistenzsystem für den Werker bis zum automatischen Auslösen der Schläge bei manueller Blechführung und von der angesteuerten robotergreifenden Blechfertigung bis zum geregelten Blechfertigungssystem schrittweise erhöht.

### 2.3 Automatisierte inkrementelle Umformverfahren

Bis auf das oben dargelegte *Kraftformerverfahren* gibt es gegenwärtig noch eine Vielzahl inkrementeller Umformverfahren, wie zum Beispiel: Drücken gegen eine elastische Matrize, flexibles Drücken, Andrücken ohne Form, Andrücken mit Form, Andrücken mit Unterstützung, Andrücken mit bewegter Stütze, Pressen mit verstellbarem Gegenhalter, Pressen mit elastischem Gegenhalter, Pressen mit spezieller Kinematik, Hämmern gegen Gegenhalter, partielles Streckziehen, partielles Tiefziehen, Wasserstrahlumformen und Schockwellenumformen [Schaefer2007].

Die Automatisierung inkrementeller Umformverfahren eröffnet viele Einsatzmöglichkeiten im Bereich der Einzelteil- und Kleinserienfertigung. Hierzu ist vor allem das Amino-Verfahren als ein numerisch gesteuerter 3D-Blechdrucker bekannt. Dabei wird das Blech in einen Universalhalter fest eingespannt. Das Umformwerkzeug besteht aus einem universell einsetzbaren, abgerundeten Umformkopf, welcher in vertikaler Richtung beweglich ist. Der Universalhalter ist auf einem Tisch festgespannt, welcher in horizontaler Richtung verschoben werden kann. Bei der Formgebung des eingespannten Bleches fährt der Umformkopf in die gewünschte vertikale Position. Der bewegliche Tisch ermöglicht ein Abfahren bestimmter Konturlinien in der Blechebene. Die Formgebung wird durch die Patrize an dem Universalhalter begünstigt. Nach jedem Abfahren einer CNC-gesteuerten Konturlinie erfolgt eine weitere Zustellung in der vertikalen Richtung mittels des Umformwerkzeuges. Durch das Abfahren vieler zweidimensionaler Konturlinien so-



wie das Zustellen zwischen den einzelnen Konturlinien entsteht eine dreidimensionale Form des anfangs ebenen Bauteils. [Hirt2002]

Vorteilhaft bei diesem Verfahren ist die zeitlich schnelle Umsetzung zwischen CAD-Daten und fertigem Bauteil. Dreidimensionale CAD-Daten, in das NC-Format konvertiert und an das 3-Achsen-Servosystem der inkrementellen Umformzelle weitergeleitet, können somit von oben nach unten in das Werkstück übertragen werden. Hierdurch gelingt eine zeitnahe Anpassung an wechselnde Kundenanforderungen. So wird der Prozess während der Formgebung nur gesteuert, nicht aber geregelt, wodurch keine Messensorik während der Umformung nötig ist. Optimierungspotenziale lassen sich im Bereich der Prozessgeschwindigkeit sowie in der erreichbaren Genauigkeit der Bauteilgeometrie feststellen. Ein weiterer Zeitverlust entsteht durch die Konstruktion einer geeigneten Patrizie, welche ein ungewolltes Durchdrücken des Umformkopfes verhindert und somit für den Umformprozess unverzichtbar ist.

Beim Amino-Verfahren kann statt des 3-Achsen-Servosystems ein 5-achsiger Industrieroboter eingesetzt werden. Die zusätzlichen Freiheitsgrade ermöglichen Hinterschnitte an Bauteilen. Trotzdem wird eine Patrizie als Gegenhalter benötigt. [Duflou2005] zeigt ein alternatives Verfahren ohne das „support tool“. Der Druckkopf dreht sich um die eigene Drehachse und die gesamte Umformung verläuft von unten nach oben. Das Verfahren bezeichnet sich als „Single point incremental forming“ und hat eine Fertigungsgenauigkeit wie beim Amino-Verfahren.

Die Funktionsweise des „Roboforming“ ist der des Amino-Verfahrens sehr ähnlich. Die Blechplatte wird an allen Seiten festgespannt. Die Formgebung erfolgt durch Abfahren bestimmter Konturlinien mit dem Werkzeug. Hierbei stützt der Gegenhalter das Blech von unten und verhindert ein unkontrolliertes Durchbiegen des Bleches. Werkzeug sowie Gegenhalter sind beweglich, was eine Formgebung des gesamten Blechs ermöglicht. Um eine möglichst genaue Geometrie des Bauteils zu erhalten, fährt das Umformwerkzeug jede Konturlinie ausschließlich in der Ebene der Platte ab. Die Zustellung des Werkzeuges senkrecht zur Oberfläche der Platte erfolgt nach jeder fertig abgefahrenen Konturlinie. Der Gegenhalter wird hierbei nicht in der senkrechten Rich-

tung bewegt. Der Materialfluss erfolgt fast ausschließlich aus der Blechdicke, wodurch eine Ähnlichkeit zum Streckdrücken erreicht wird. [Meier2008]

Das Roboforming-Verfahren verzichtet auf eine bauteilspezifische Matrize, da durch Werkzeug und Gegenhalter eine hohe Formflexibilität gegeben ist. Es können konkave sowie konvexe Strukturen durch die verschiedenen Positionen von Werkzeug und Gegenhalter produziert werden. Auf Kundenwünsche bezüglich Änderungen in der Geometrie kann zeitnah reagiert werden. Nachteile bietet das Verfahren im Bereich der Geometrieabweichung. Neben der Umformstrategie und Rückfederung ist die Positioniergenauigkeit der Werkzeuge eines der Hauptproblemfelder des Verfahrens. Die Nachgiebigkeit des Roboters birgt ein weiteres Potenzial zur Verbesserung des Prozesses.

Als Umformkopf dient beim „Roboshaping“ ein spezieller Hammer, der mit 200 Schlägen pro Sekunde und einer Stempelamplitude von 1 mm das eingespannte Blechbauteil bearbeitet. Die Formgebung des Bleches wird wie beim Roboforming durch das Abfahren bestimmter Konturlinien auf dem Blechbauteil ausgeführt. Das Hämmern des Werkzeuges führt hierbei zur Formgebung. Die Zustellung senkrecht zum Blech (Z-Richtung) erfolgt nach jeder fertig abgefahrenen Konturlinie. [Westkämper2003]

Ziel des Verfahrens ist es, direkt aus den CAD-Daten mit einem Industrieroboter Bleche hämmernd zu formen. Der Industrieroboter positioniert den Hammer so, dass dieser ungehindert die Form realisieren kann. Auch dieses Verfahren verzichtet komplett auf eine Matrize, um eine hohe Formflexibilität zu gewährleisten. Die auftretende Reibung führt bei diesem Verfahren zu großem Verschleiß. Ein Herabsetzen der Reibung kann durch eine niedrigere Schlagfrequenz erreicht werden, wodurch aber die Umformung negativ beeinflusst wird. Darüber hinaus kann bei diesem Verfahren keine örtlich konstante Flächenpressung erreicht werden, was eine schlechte Bauteiloberflächenqualität zur Folge hat.

Im Gegensatz zu den bisherigen werkzeuggesteuerten Verfahren funktioniert ein strahlbasiertes Verfahren mit einem Kugel-, Wasser- oder Laserstrahl [Lamminen2004]. Durch

inkrementelle Impulsübertragung des Strahls wird eine Blechplatte in eine gewünschte Geometrie umgeformt. Im Bauteil kann eine hohe Verfestigung erreicht werden und daher ergibt sich eine geringe Formänderung.

#### **2.4 Weiterer Forschungsbedarf**

Als zweidimensionale Blechumformung wurde das Fertigen von L-förmigen Feinblechen durch Einsatz der Messtechnik, Steuerungs- und Regelungstechnik sowie Robotertechnik vollautomatisiert. Ein breiterer Anwendungsbereich des Kraftformers ist die Herstellung von Verkleidungsteilen im Automobil-, Schienenfahrzeug- und Schiffbau. Es bedarf daher weiterer Forschung und Entwicklung des Automatisierungsverfahrens für dreidimensionale Blechumformungen.

Als Konkurrenz im Bereich inkrementeller Blechumformung zeigen automatisierte Umformverfahren wie z. B. das Amino-Verfahren, Roboforming, Roboshaping ein gleiches Prinzip der Formgebung. Allerdings wird mit einer Verfahrkonturlinie in einer Ebene und einer Zustellung senkrecht zu dieser Ebene ein solches inkrementelles Umformverfahren im Wesentlichen nur als zweieinhalbdimensional gekennzeichnet. Vor Beginn der Umformung muss eine Blechplatte auf einer speziellen Umformvorrichtung festgespannt werden, um eine hohe Fertigungsgenauigkeit zu erzielen. Wegen der Verspannung über den ganzen Umformprozess hinweg entsteht eine starke Rückfederung an der Platte nach der Fertigung. Daher ist die Fertigungsgenauigkeit prinzipbedingt beschränkt. Darüber hinaus sind solche Verfahren jedoch dem Tiefziehen ähnlich, da die Blechplatte nur durch Strecken umgeformt wird.

Das spannlose Stauchen als Alleinstellungsmerkmal inkrementeller Umformverfahren zeigt im Bereich dreidimensionaler Blechumformung großes Anwendungs- und auch Automatisierungspotenzial. Es liegen bisher keinerlei Kenntnisse über die Automatisierung des dreidimensionalen Stauchprozesses vor. Das Automatisierungsprinzip beim zweidimensionalen Stauchen/Strecken kann wegen der Formkomplexität des Bauteils nicht direkt übertragen werden. Außerdem ist die Technik des zweieinhalbdimensiona-

len Umformverfahrens nicht nutzbar, da im Stauchprozess die Blechplatte frei bewegbar ist.

Des Weiteren ist die Anwendbarkeit der vorhandenen Messtechnik, Steuerungs- und Regelungstechnik sowie Robotertechnik noch nicht untersucht worden. Deren Weiterentwicklung steht noch aus. Es gibt bis heute noch keine FEM- oder andere Simulationsergebnisse des dreidimensionalen Stauchens.

### 3 Zielsetzung und Lösungsansatz

Mit dem Trend der Produktindividualisierung steigt auch der Bedarf an individuellen Blechbauteilen, die heutzutage hauptsächlich handwerklich gefertigt werden. Der in dieser Arbeit verwendete Kraftformer hilft dabei dem Werker besonders in der Fertigung von Bauteilen mit komplexen Geometrien. Dadurch wird ein deutlich effizienterer Arbeitsvorgang erreicht als mit einem in der Steinzeit entwickelten Umformwerkzeug wie dem Hammer. Trotzdem bleibt eine solche Blechformgebung mit dem Kraftformer weiterhin handwerklich. Um den steigenden Bedarf zu decken, soll die Blechfertigung am Kraftformer schneller und günstiger werden.

Ein entscheidender Schritt dafür stellt die Automatisierung des Prozesses dar. Dies wurde bereits für das Stauchen/Strecken von Blechteilen mit L-Profilen realisiert (siehe Abschnitt 2.2). Die Blechumformung erfolgte allerdings nur in einer Ebene, was eine starke Einschränkung der Fertigung darstellt. Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher, ein Verfahren zur automatisierten Herstellung von *dreidimensionalen* Blechteilen durch inkrementelles Stauchen zu entwickeln.

Im Unterschied zu den L-förmigen Blechteilen hat in dieser Arbeit ein Bauteil mit gleichsinnig doppelt gekrümmten Oberflächen eine komplexere Geometrie. Dies deutet auf eine räumliche Geometrieänderung des Bauteils bei der Stauchung hin, wobei bei dem verfolgten Ansatz die Bauteilführung am Kraftformer ebenso im Raum erfolgt. Prinzipiell wird bei jeder Umformoperation das Bauteil an einer bestimmten Lage festgehalten und mit einer gewissen Kraft gestaucht. Deshalb steht die Ermittlung der Schlagposition bzw. der dazu gehörenden Schlagstärke im Mittelpunkt der Verfahrensentwicklung.

Das in dieser Arbeit benutzte markerbasierte Trackingsystem kann in Echt die Position und die Orientierung eines lokalen Koordinatensystems auf der Bauteiloberfläche bestimmen. Durch das Definieren eines Ursprungs auf der Oberfläche im nicht verformten Bereich kann die Schlagposition durch dieses Koordinatensystem beschrieben

werden. Bei dieser Methode wird die Bauteilführung vom Werker aufgezeichnet. Wie in der Arbeit gezeigt, ist der verwendete Roboter damit in der Lage, diese Schlagposition im Roboterkoordinatensystem zu reproduzieren. Allerdings erfordert dies eine Roboter-Kamera-Kalibrierung, um Transformationen zwischen Roboter- und Kamerakoordinatensystem zu gewährleisten. Durchfährt der Roboter die aufgezeichnete Koordinatensequenz, ahmt er den Werker nach. Wenn bei der manuellen Bauteilführung die Schlagstärke der aktuellen Schlagposition zugeordnet gespeichert wird, lässt sich diese Blechfertigung allein vom Roboter und Kraftformer wiederholen.

Fakt ist, dass die Ermittlung der beiden Parameter durch das Kopieren der Arbeit vom Werker erfolgen kann. Dieses Automatisierungsprinzip nutzt die menschlichen Erfahrungen aus und transferiert sie unmittelbar in die robotergreifende Blechfertigung.

Da im Kopierprinzip manuelle Arbeit stets erforderlich ist, eignet sich dieses Verfahren aus Kostengründen für die Kleinserienfertigung. Die Einzelteilerfertigung erfordert hingegen ein vollautomatisiertes Blechfertigungsverfahren für das inkrementelle Stauchen. Der Lösungsweg ist, den Stauchprozess in einer virtuellen Fertigungsumgebung zu simulieren. Die reale Fertigung erfolgt danach durch das Weiterverarbeiten der Simulationsergebnisse. Dies verlangt ein realitätsnahes Stauchmodell, das den inkrementellen Umformprozess in einem vertretbaren Rahmen abbildet. Das modellbasierte Verfahren ermittelt demnach die Schlagposition und -stärke aus den Simulationsergebnissen.

Die zwei Verfahren werden in den folgenden Kapiteln ausführlich beschrieben und für bereits mögliche Anwendungen bezüglich ihrer Fertigungsgenauigkeit durch Versuche evaluiert. Beim Kopierverfahren wird zur Aufzeichnung der manuellen Bauteilbewegung und Ausführung der Roboter-Kamera-Kalibrierung für den Kopierprozess eine Genauigkeitsanalyse durchgeführt. Das modellbasierte Verfahren benötigt vor allem ein verifiziertes Stauchmodell und identifizierte Modellkennlinien. In der folgenden Abbildung 3.1 werden vom Prinzip der zwei Verfahren ausgehend die geplanten Versuche dargestellt.

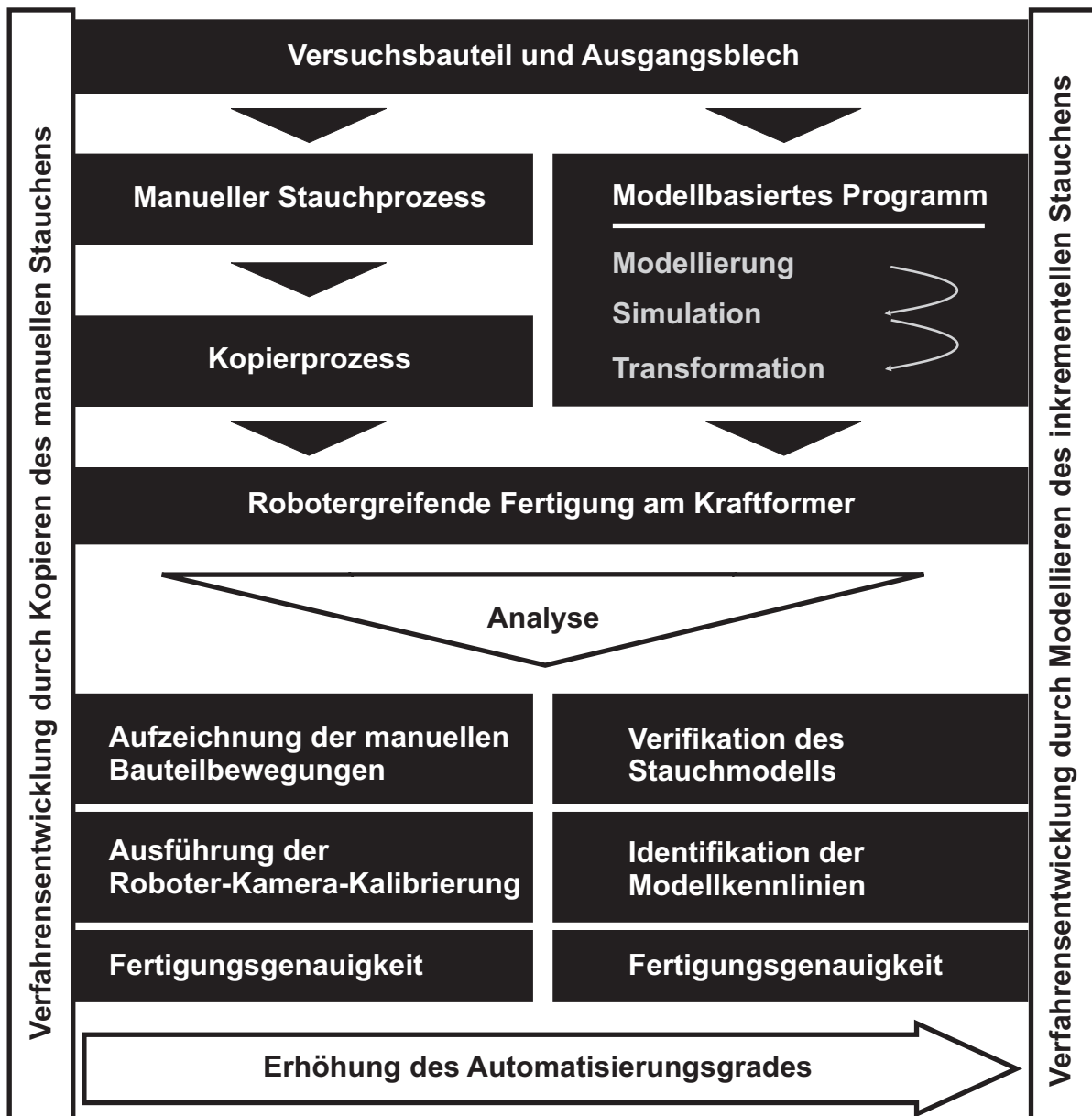


Abbildung 3.1: Versuchsplan des Kopierverfahrens und des modellbasierten Fertigen eines 3D-Bauteils.

## 4 Versuchsanlagen, Messeinrichtungen und Softwaretools

Für die geplanten Versuche bilden ein Kraftformer und ein Roboter zusammen die Fertigungseinheit. Zum optischen Vermessen sind ein markerbasiertes Trackingsystem und ein GOM ATOS-Messsystem verfügbar. Es werden die eigene Applikation *TreibTec* und für die benötigten Simulationen das bekannte Programmierertool *matlab* vorgestellt.

### 4.1 Fertigungseinheit

#### 4.1.1 Kraftformer

Für die geplanten Versuche wird das Modell Eckold KF 330 „Piccolo“ eingesetzt. Die Abbildung 4.1 zeigt die Abmessungen der Maschine.

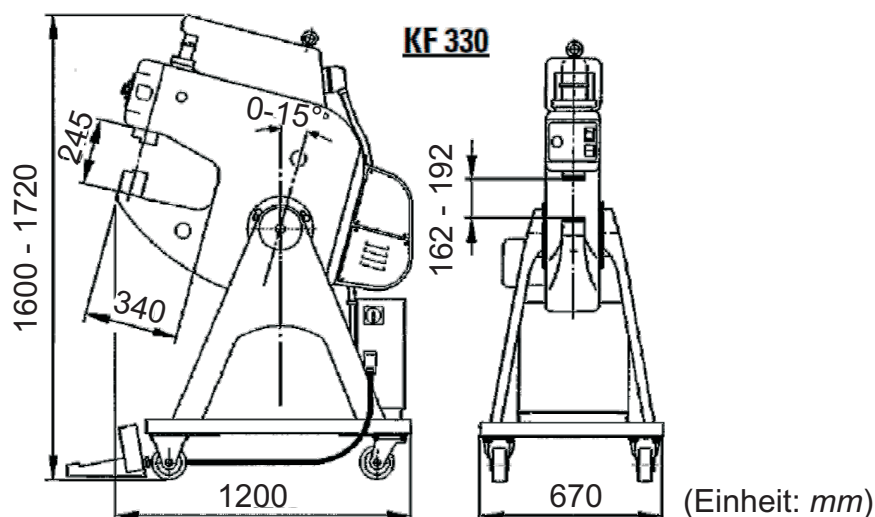


Abbildung 4.1: Abmessungen des verwendeten Kraftformers KF 330 „Piccolo“ [Kraftformer2003].



Es wird in dieser Arbeit ein kreisförmiges Stauchwerkzeug mit einem Durchmesser der Außenkontur von 40 mm verwendet. Das Werkzeug wiegt 2,5 kg und kann Tiefziehstähle mit einer Dicke von bis zu 1,5 mm bearbeiten.

Speziell für diese Forschungsarbeit wurde zur Steuerung des Einzelhubs und der Stößelverstellung ein Antriebsregler von der Firma Lenze installiert. Dabei kann ein Leit-rechner über eine serielle Verbindung RS232 und ein Feldbusmodul das Steuersignal von außen zum Antriebsregler bzw. Kraftformer senden, somit reagiert der Stößel rechtzeitig auf Angaben der Zustellung und der Stößelverstellung.

Die ausgewählten technischen Daten des Kraftformers sind:

<b><i>Kenngröße</i></b>	<b><i>Wert</i></b>
<i>Arbeitshub</i>	<i>8 mm</i>
<i>Arbeits-takte pro Minute</i>	<i>400</i>
<i>Leistung des Antriebsmotors</i>	<i>1,5 kW</i>
<i>Maximale Umformkraft für Stahl</i>	<i>max. 2,0 mm (Dicke)</i>
<i>Stößelverstellung durch Getriebemotor</i>	<i>30 mm</i>

*Tabelle 4.1: Technische Daten des Kraftformers mit der Modellbezeichnung: Eckold KR 330 Piccolo.*

#### **4.1.2 Roboter**

Zur automatischen Bauteilführung kommt ein Industrieroboter KUKA KR-30 zum Einsatz (siehe Abbildung 4.2). Am definierten „Tool Center Point“ (TCP) hat er eine maximalen Traglast von 30 kg und eine Wiederholgenauigkeit von  $\pm 0,15$  mm. Die Verfahrensgeschwindigkeit des TCP im kartesischen Koordinatensystem hängt im Wesentlichen von der Drehgeschwindigkeit der Achsen ab. Die Achsdaten des Roboters sind:

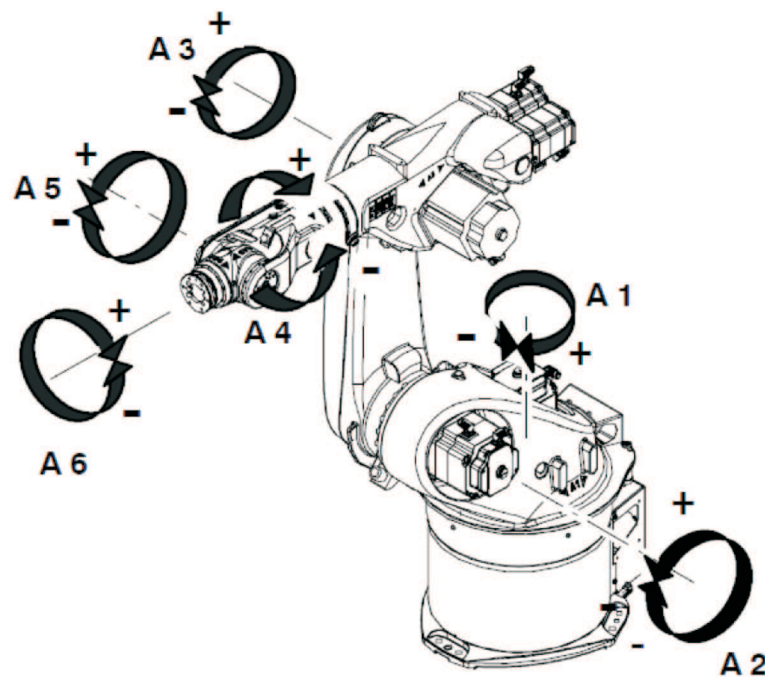


Abbildung 4.2: Drehachsen A1 bis A6 vom KUKA KR-30 [Kuka2004].

<b>Achse</b>	<b>Bereich (Software)</b>	<b>max. Geschwindigkeit</b>
A1	$\pm 185^\circ$	$140^\circ/\text{s}$
A2	$+35^\circ/-135^\circ$	$140^\circ/\text{s}$
A3	$+158^\circ/-120^\circ$	$140^\circ/\text{s}$
A4	$\pm 350^\circ$	$260^\circ/\text{s}$
A5	$\pm 119^\circ$	$245^\circ/\text{s}$
A6	$\pm 350^\circ$	$322^\circ/\text{s}$

Tabelle 4.2: Achsdaten des KUKA-Roboters KR-30.

Der „Tool Center Point“ hat das folgende Koordinatenformat: in Translation ( $X_R, Y_R, Z_R$ ) und in Rotation ( $A_R, B_R, C_R$ ). Wird eine gewünschte Position bzw. Orientierung des TCP in diesem Format am Bedienpanel angegeben, kann sich der Roboter linear und geschwindigkeitsgesteuert zum Ziel bewegen. Zur Steuerung der Bewegung von einem Leitreechner hat KUKA einen Steuerschrank und zugehörige Software KRC2 („KU-

KA Robot Control“) zur Verfügung gestellt, wobei die Steuerungsdaten bzw. die aktuellen TCP-Koordinaten durch eine serielle Verbindung gesendet bzw. empfangen werden können. Seit Juli 2006 ist das von KUKA freigegebene Technologiepaket KUKA Ethernet.KRL.XML verfügbar. Statt der seriellen Verbindung ermöglicht es eine schnellere Kommunikation zwischen Roboter und Leitreechner per TCP/IP-Verbindung [Kuka2003].

## Eulerwinkel

Die Eulerwinkel setzen die Orientierung eines Koordinatensystems gegenüber einem anderen Koordinatensystem in Beziehung. In einem dreidimensionalen Koordinatensystem werden drei Eulerwinkel  $A$ ,  $B$  und  $C$  um die Achse  $Z$ ,  $Y$  und  $X$  benötigt (siehe Abbildung 4.3).

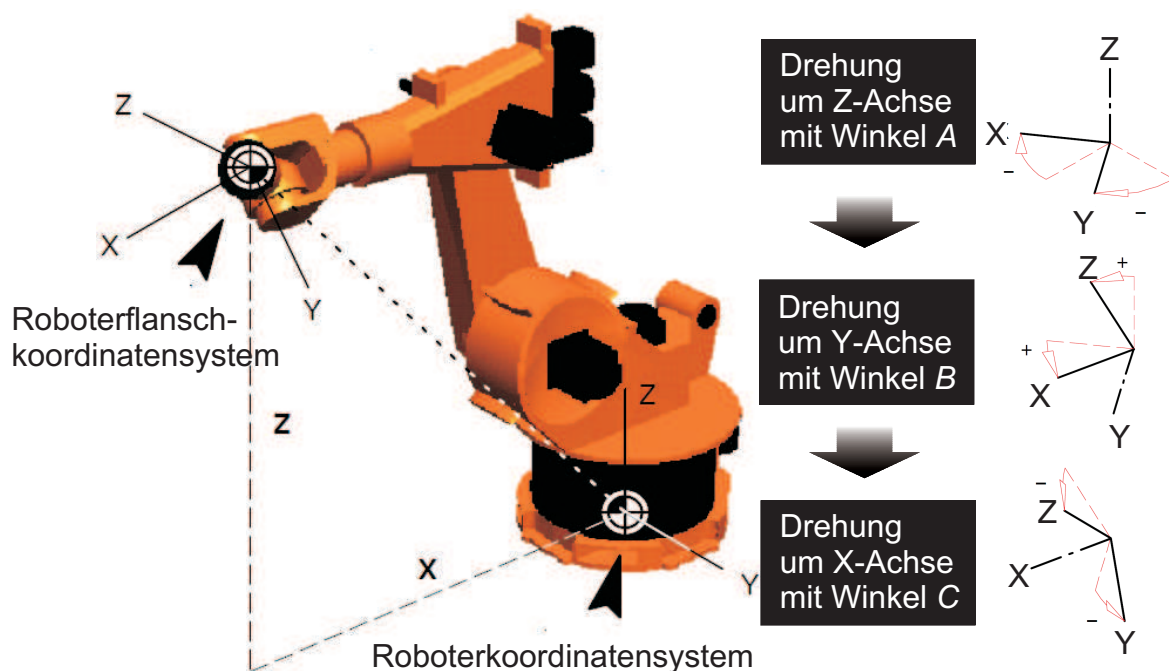


Abbildung 4.3: Orientierung des Roboterflanschkoordinatensystems entsteht durch die dreimalige Verdrehung um Z-, Y- und X-Achse jeweils mit den Drehwinkeln  $A$ ,  $B$  und  $C$  [Kuka2003].

Die drei Drehmatrizen werden wie folgt berechnet:

$$R_Z(A) = \begin{pmatrix} \cos A & -\sin A & 0 \\ \sin A & \cos A & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (4.1)$$

$$R_Y(B) = \begin{pmatrix} \cos B & 0 & \sin B \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin B & 0 & \cos B \end{pmatrix}, \quad (4.2)$$

$$R_X(C) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos C & \sin C \\ 0 & -\sin C & \cos C \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

Die gesamte Drehmatrix  $R_{euler}$  entsteht durch die Multiplikation der drei Matrizen:

$$R_{euler} = R_Z \cdot R_Y \cdot R_X = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

Oder umgekehrt ergeben sich die drei Drehwinkel  $A$ ,  $B$  und  $C$  aus der bekannten Drehmatrix  $R_{euler}$ :

$$A = \operatorname{atan}\left(\frac{r_{21}}{r_{11}}\right), B = \operatorname{atan}\left(\frac{-r_{13}}{\sqrt{r_{11}^2 + r_{21}^2}}\right), C = \operatorname{atan}\left(\frac{r_{32}}{r_{33}}\right) \quad (4.5)$$

Dazu ist es notwendig, die Singularitäten zu beachten: Wenn  $B = \pm\pi$ , dann ist  $A = 0$  und  $C = \pm\operatorname{atan}(r_{12}/r_{22})$ .

### 4.1.3 Greifer

Der Roboter ist ursprünglich mit einem Backengreifer der Firma Schunk ausgerüstet, der über die KUKA-Steuersoftware geöffnet bzw. geschlossen werden kann. Der Backengreifer ist jedoch für ein Bauteil mit gleich doppelgekrümmten Oberflächen nicht geeignet, weil die Haltekraft der Backen nie ausreichend zur Vermeidung einer Drehbewegung des Bauteils ist. Um eine stabile Positionierung des Bauteils zu erreichen, muss der zu entwickelnde Greifer die folgenden Anforderungen erfüllen:

- angepasste Schnittstelle zum Roboterflansch
- einstellbare Haltekräfte.
- Möglichkeit der Klemmung des Bauteils zur Reduzierung der Drehbewegungsmöglichkeit im Greifer.

Außerdem soll der Greifer ein niedriges Eigengewicht haben und die Einspannung unterschiedlicher Bleche in Geometrie und Dicke ermöglichen. In Abbildung 4.4 wird in dieser Arbeit der für die geplanten Versuche entwickelte Greifer gezeigt.

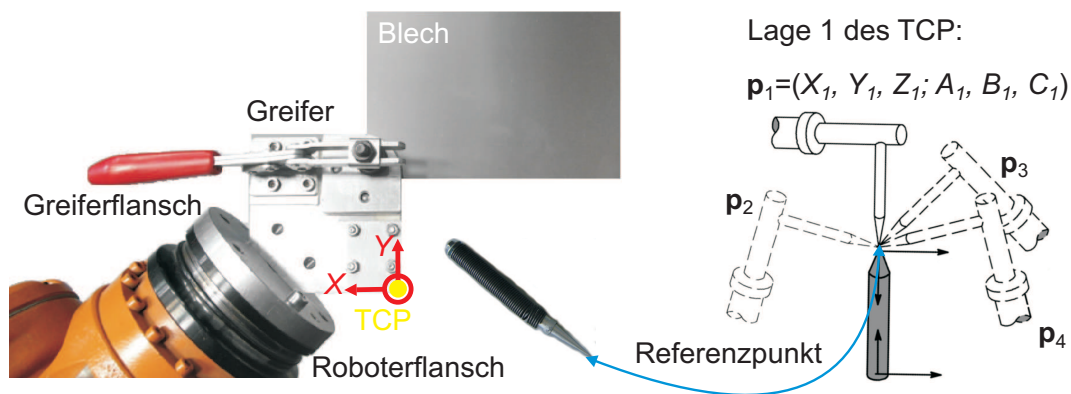


Abbildung 4.4: Entwickelter Greifer mit einem vordefinierten TCP („Tool Center Point“), der mit sogenannter Vier-Punkte-Methode im Roboterkoordinatensystem bestimmt wird [Kuka2004].

Der Greifer wird zuerst in einem Flansch über zwei Stifte eingesteckt und danach verschraubt. Der Greiferflansch mit dem Greifer wird direkt am Roboterflansch in einer definierten Position festgeschraubt, damit das TCP-Koordinatensystem unverändert bleibt. Der TCP kann nach Bedarf im Roboterkoordinatensystem durch die Vier-Punkte-Methode wie in der oberen Abbildung neu definiert werden. Somit steht das lokale TCP-Koordinatensystem fest an dem Ursprung des TCP [Kuka2004].

Das Blech bzw. Bauteil wird in die Ecke des Greifers eingelegt und von einem Aufsatz durch den Halter festgeklemmt, so dass prinzipiell eine Drehbewegung vermeidbar

wird. Es besteht jedoch die Gefahr, dass das Blech aus dem Greifer herausrutscht. Zudem kann die Haltekraft durch eine Umpositionierung des Hebelstützpunktes vergrößert werden. Außerdem sind zwei Gummiteile an der Haltestelle zur Dämpfung der Schwingungen und Erhöhung der Reibkräfte befestigt.

## 4.2 Optisches Messsystem

### 4.2.1 Trackingsystem

Das verwendete Trackingsystem Polaris Vicra besteht aus einer vorkalibrierten Stereokamera und reflektierenden Markern. Die Stereokamera mit inneren infraroten Beleuchtungen hat einen Messraum von  $0,5 \text{ m}^3$  und eine markergrößenabhängige Genauigkeit. Das System liefert die Markerpositionen mittels eines integrierten Bildverarbeitungssystems. Daher sorgt es im manuellen Umformprozess für die Erfassung der Markerpositionen bzw. der Bauteilbewegungen. Es sollte in die Fertigungseinheit Kraftformer-Roboter integriert werden.

Zur Installation auf dem Kraftformer soll der Abstand von den Objektiven der Kamera zu der Arbeitsraumgrenze des Kraftformers größer als  $557 \text{ mm}$  sein. Die Stereokamera wird am Gestell des Kraftformers befestigt und beobachtet die Blechumformung von unten, wie die Abbildung 4.5 verdeutlicht. Die Kamera wird am Kraftformer so positioniert, dass der Werkzeugmittelpunkt dem Zentrum des Messvolumens nahe liegt. Idealerweise wird das Kamerakoordinatensystem (CKS) parallel zum Kraftformerkkoordinatensystem (KKS) ausgerichtet. Da die Stereokamera selbst infrarot leuchtet, ist sie sehr lichtempfindlich gegen helles Licht. Deswegen muss die Helligkeit der Arbeitsumgebung begrenzt sein. Das Trackingsystem kommuniziert mit dem Steuerrechner über die serielle Verbindung *RS232*, wobei eine Sequenz codierter Befehle zum Starten des Trackings vom Steuerrechner gesendet werden muss. Die Arbeitsfrequenz (die Tracking rate) der Trackingkamera ist zur Herstellung der Verbindung vorbestimmt und kann aber je nach Bedarf angepasst werden. Der Steuerrechner erhält die zurückgesendeten Tracking-signale, die die räumlichen Koordinaten der Marker angeben.

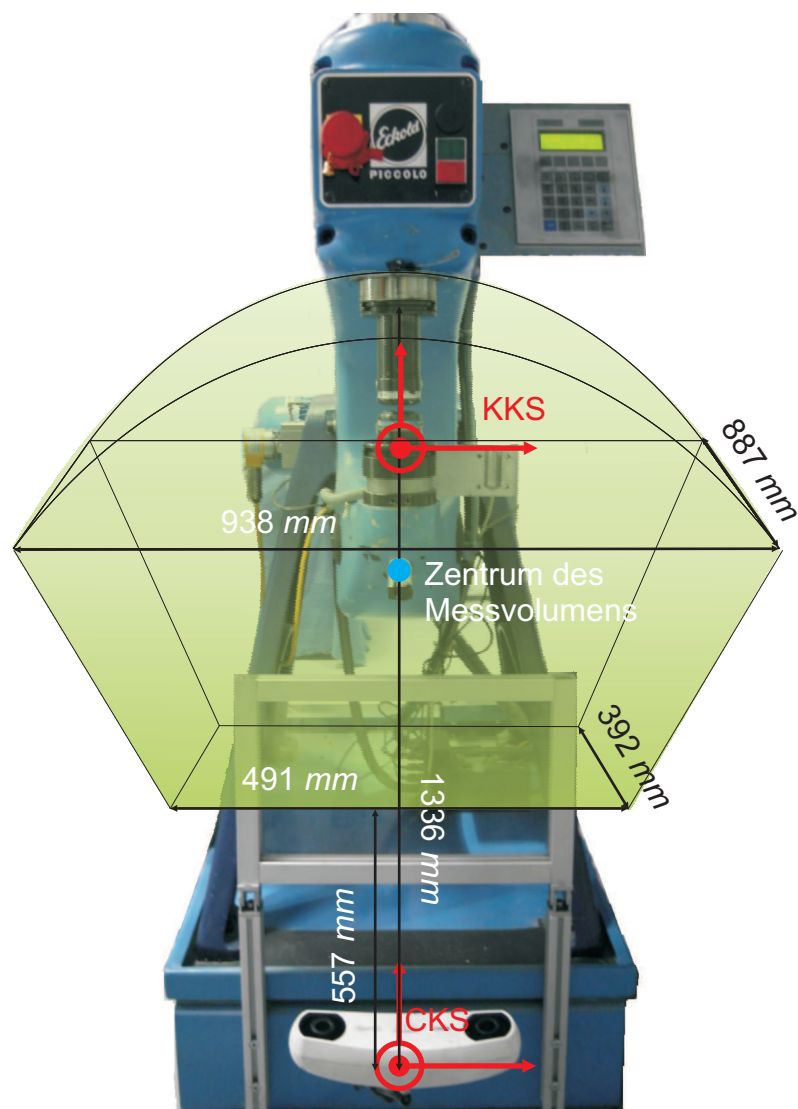


Abbildung 4.5: Installation der Trackingkamera am Kraftformer. Das Messvolumen wird mit dem grünen, transparenten Overlay dargestellt [NDI2011]. (KKS: Kraftformerkoordinatensystem; CKS: Kamerakordinatensystem)

Die ausgewählten technischen Daten von Polaris Vicra sind:

<b><i>Kenngröße</i></b>	<b><i>Wert</i></b>
<i>Genauigkeit mit 95 % Vertrauensintervall</i>	<i>0,5 mm</i>
<i>max. Update Rate</i>	<i>60 Hz</i>
<i>Betriebstemperatur</i>	<i>10 °C bis 30 °C</i>
<i>max. Datenrate</i>	<i>1,2 Mb/s</i>

*Tabelle 4.3: Technische Daten der Trackingkamera des Modells Polaris Vicra.*

### **Tracking durch Erkennung eines Markerbaums**

Da die Trackingkamera funktional markerbasiert ist, müssen die reflektierenden Marker zur Aufzeichnung der Bauteilführung an dem Blech angebracht werden. Um das Markerkoordinatensystem lokal erfassen zu können bzw. eine feste Markerstruktur zu gewährleisten, wird ein Markerbaum mit einer vordefinierten Konfiguration von mehreren Markern auf einem festen Gestell aufgebaut.

In der vorliegenden Arbeit wird der Markerbaum mit drei gleich großen Markern konfiguriert (siehe Abbildung 4.6). Das Trackingsystem liefert dann unsortierte Koordinaten von den drei Markern. Um das Markerkoordinatensystem aufzubauen, müssen sich die erfassten Marker in einer festgelegten Reihenfolge befinden. Dies kann durch das Matching des Markerbaumes an dessen Dreieckseitenlängen erfolgen. Die Voraussetzung dafür ist, dass der Markerbaum in der Geometrie möglichst unsymmetrisch ist. Damit ergibt sich jeweils nur ein eindeutiger Abstand zwischen den Markern für die Markerkennung. Praktisch werden alle drei Seitenlängen aus je zwei Markern berechnet und aus denen gibt es insgesamt sechs Kombinationsmöglichkeiten  $\{(a_j, b_j, c_j), j = 1 \dots 6\}$ . Nach dem Vergleich mit den gegebenen konfigurierten Abständen  $(a_0, b_0, c_0)$  verbleibt die einzige Möglichkeit, die der Realität am nächsten kommt:

$$j = \arg \min_j (|a_j - a_0| + |b_j - b_0| + |c_j - c_0|). \quad (4.6)$$



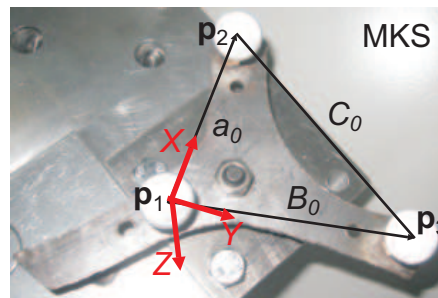


Abbildung 4.6: Markerbaum bestehend aus drei Markern und einem Gestell, auf dem Greifer befestigt. (MKS: Markerkoordinatensystem;  $\mathbf{p}_{1-3}$ : Koordinaten der Marker;  $a_0, b_0, c_0$ : Länge zwischen zwei Markern)

Nach gleichem Prinzip können Markerbäume mit mehr als drei Markern bei jeder Messung gematcht werden, wobei die Markerkonfigurations- bzw. Erkennungskomplexität deutlich ansteigt.

Nachdem das Trackingsystem den Markerbaum im Sichtbereich erkennt, kann eine räumliche Lage ( $\mathbf{t}_k, E_k$ ) durch die drei Marker beschrieben werden. Gespeichert werden die Raumpositionen der drei Marker ( $\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3$ ) im Kamerakoordinatensystem (CKS). Durch das Aufstellen des lokalen Markerkoordinatensystems (MKS) werden die Verschiebung  $\mathbf{t}_k$  und die Drehung  $E_k$  aus den Koordinaten der drei Marker berechnet:

$$\mathbf{t}_k = \mathbf{p}_1, \quad (4.7)$$

$$E_k = (\mathbf{e}_x, \mathbf{e}_y, \mathbf{e}_z), \quad (4.8)$$

$$\mathbf{e}_x = \mathcal{N}(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1), \quad (4.9)$$

$$\mathbf{e}_y = \mathcal{N}((\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) \times (\mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1) \times (\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1)), \quad (4.10)$$

$$\mathbf{e}_z = \mathcal{N}((\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) \times (\mathbf{p}_3 - \mathbf{p}_1)), \quad (4.11)$$

$$\mathcal{N}(\mathbf{p}) = \frac{\mathbf{p}}{\|\mathbf{p}\|}. \quad (4.12)$$

Die so ermittelte Lage ( $\mathbf{t}, E$ ) des Markerbaums bezieht sich immer noch auf das Kamerakoordinatensystem.

#### 4.2.2 GOM-Messsystem

Das in dieser Arbeit verfügbare optische Messsystem GOM ATOS wird zur Erfassung der Geometrien der Bleche und Bauteile benutzt (siehe Abbildung 4.7).

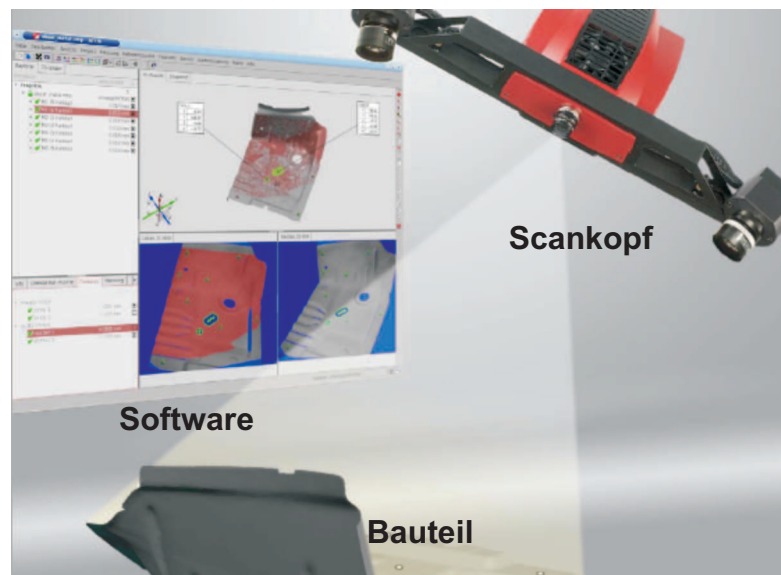


Abbildung 4.7: GOM ATOS-Messsystem besteht aus einem Scankopf, einem verstellbaren Stativ und der Software ATOS Professional [GOM2011].

Die Messgenauigkeit wird durch ein vorgegebenes Kalibrierungsmuster vor der Messung bestimmt und beträgt hierbei ca.  $\pm 0,6 \text{ mm}$ . Jede Messung erfolgt durch nur eine Aufnahme der Bauteiloberfläche. Die Messdaten werden zunächst in die mitgelieferte ATOS-Software eingelesen und für weitere Bearbeitungen vorbereitet. Dazu können die Geometrien zwischen mehreren gemessenen Blechen mittels der „Best-Fit“-Funktion in der Software verglichen werden. Außerdem können die Messdaten als Punktwolke in eine Textdatei exportiert und von einem anderen Programm bearbeitet werden. Die ausgewählten technischen Daten des Systems sind:

<b><i>Kenngröße</i></b>	<b><i>Wert</i></b>
<i>Kamerapixel</i>	<i>2×2000000</i>
<i>Messbereich</i>	<i>35×30–1000×750 mm<sup>2</sup></i>
<i>Punktabstand</i>	<i>0,021–0,615 mm</i>
<i>Arbeitsabstand</i>	<i>450–1200 mm</i>
<i>Gewicht</i>	<i>ca. 4 kg</i>
<i>Umgebungslicht</i>	<i>unempfindlich</i>
<i>Messobjekt mit glänzender Oberfläche</i>	<i>empfindlich, Oberfläche matt sprühen</i>
<i>Umgebungsschwingung</i>	<i>unempfindlich mit GOM's dynamischer Referenzierung</i>
<i>Betriebstemperatur</i>	<i>5–40 °C, nicht kondensierend</i>

*Tabelle 4.4: Technische Daten des angewendeten GOM ATOS-Messsystems.*

### **„Best-Fit“-Analyse**

Obwohl in der ATOS-Software das Geometrieverarbeitungsmodul „Best-Fit“ bereits vorliegt, soll hier die „Best-Fit“-Funktion zum Geometrievergleich mathematisch verdeutlicht werden. Einerseits kann ein besseres Verständnis über verteilte Geometrieabweichungen auf der ganzen Oberfläche erworben werden. Andererseits soll diese Funktion in die Simulation des inkrementellen Stauchens integriert werden.

Die „Best-Fit“-Funktion nutzt den ICP-Algorithmus (engl.: „Iterative Closest Point“), eine weit verbreitete Registrierungsmethode [Besl1992], zur Verarbeitung der erfassten Geometriedaten bzw. der Punktwolken. Der Algorithmus repräsentiert einen Optimierungsprozess, worin ein definierter Geometrieabstand zwischen zwei zu vergleichenden Geometrien schrittweise minimiert wird. Seien  $\{\mathbf{p}_i^e | i = 1, 2, \dots, n_e\}$  und  $\{\mathbf{p}_j^m | i = 1, 2, \dots, n_m\}$  die Punktwolken der gegebenen Geometrien, dann sucht der ICP zuerst die nächstgelegenen Nachbarpunktpaare aus den beiden Punktwolken. Der Abstand der Geometrien

wird mithilfe der gefundenen Nachbarkpunktpaare  $\{(\mathbf{p}_k^e, \mathbf{p}_k^m) | k = 1, 2, \dots, n_p\}$  wie folgt formuliert:

$$g = \frac{1}{n_p} \sum_{k=1}^{n_p} \|R_b \cdot \mathbf{p}_k^e + \mathbf{t}_b - \mathbf{p}_k^m\|^2. \quad (4.13)$$

Zu jedem Schritt werden die Rotationsmatrix  $R_b$  und der Translationsvektor  $\mathbf{t}_b$  durch das Minimieren des Abstandes bestimmt (siehe Anhang 8.2). Nach einer Rotation mit  $R_b$  und einer Translation mit  $\mathbf{t}_b$  der einen Punktwolke werden die Punkte gegenüber der anderen Punktwolke neu positioniert. Damit rücken die zwei Geometrien näher und näher zueinander, bis der Abstand nicht mehr veränderlich ist. Dieser Konvergenzvorgang wird in der Praxis durch ein Gütekriterium abgebrochen, um den Rechenaufwand effektiv zu reduzieren.

### 4.3 Softwaretools

#### Applikation *TreibTec*

In diesem Forschungsvorhaben wird für praktische Anwendungen der zu entwickelnden Automatisierungsverfahren eine Applikation in Visual C++ programmiert. Sie besteht aus vier Modulen: *Parametereingabe*, *Verbindung*, *Prozessablauf* und *Visualisierung* (siehe 4.8).

Im Modul *Parametereingabe* können jeweils für den Kraftformer die Einzelhubtiefe bzw. die Stößelhöhe eingestellt und für das Trackingsystem eine neue Markerstruktur erkannt werden. Die Steuerung von Kraftformer, Roboter bzw. Trackingsystem erfolgt durch Aktivieren jeweiliger *Verbindungen* zum Leitreechner. Beim *Prozessablauf* werden zum Erreichen eines gegebenen Fertigungsziels die generierten Steuerungsdaten ausgeführt. Im Modul *Visualisierung* werden der Kraftformer und der Greifer mit der Markerstruktur dargestellt.

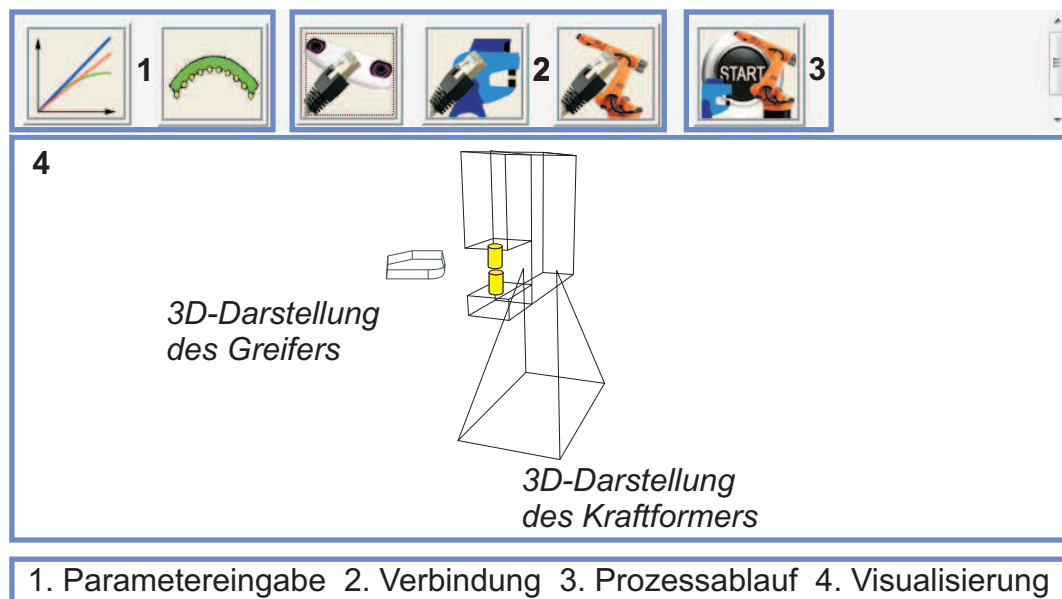


Abbildung 4.8: Benutzeroberfläche der Applikation TreibTec.

## Matlab

Matlab ist eine geeignete Programmiersprache, mit der die hier benötigten Funktionen schnell realisiert und die resultierenden Ergebnisse bequem visualisiert werden können. Sie wird zum Simulieren des inkrementellen Stauchens benutzt.

## 5 Verfahrensentwicklung durch Kopieren des manuellen Stauchens

Das Kapitel beschreibt unter der Zielsetzung dieser Forschungsarbeit den ersten Lösungsansatz. Das Kopierverfahren wird zunächst ausführlich beschrieben, anschließend werden die wichtigen Prozessschritte analysiert.

### 5.1 Verfahrensbeschreibung

Im ersten Teil des zu entwickelnden Verfahrens muss einmalig die manuelle Fertigung eines Bauteils durchgeführt werden, wobei die Prozessparameter *Schlagposition* und *-stärke* synchron gespeichert werden. Aus dem zweiten Teil *Kopieren* ergeben sich schließlich die Steuerungsdaten für die roboterunterstützte Fertigung (siehe folgende Abbildung).

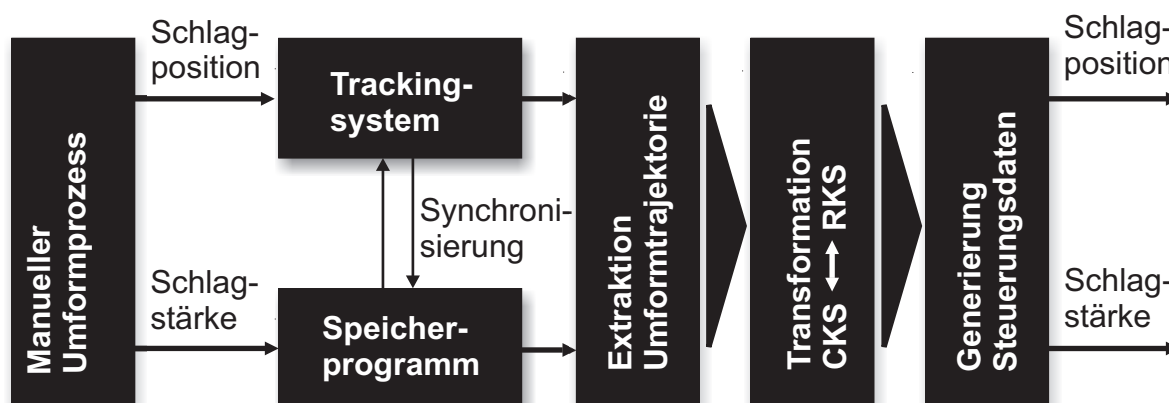


Abbildung 5.1: Prozessablauf des Kopierverfahrens. (CKS: Kamerakoordinatensystem; RKS: Roboterkoordinatensystem)

Das Kopieren der Umformtrajektorie enthält die drei folgenden Prozessschritte:

- Extrahieren der Umformtrajektorie aus der aufgezeichneten Bauteilführung;

- Transformation der Umformtrajektorie vom Kamera- ins Roboterkoordinatensystem;
- Generierung der Steuerungsdaten zur automatisierten Bauteilfertigung.

Da im ersten Teil die manuelle Arbeit nicht verzichtbar ist, wird dieses Verfahren als „halbautomatisiert“ bezeichnet.

### **5.1.1 Erfassung des manuellen Fertigungsprozesses**

Die manuelle Fertigung beginnt mit einem ebenen Blech, das inkrementell zu einer gleich doppelgekrümmten Oberfläche umgeformt wird. In dem Umformprozess greift ein Werker das Blech an den Rändern mit beiden Händen an. Er bewegt es zwischen oberem und unterem Stauchwerkzeug in eine bestimmte Lage, bei der der Einzelschlag mit einer entsprechenden Schlagstärke ausgelöst wird. Dazu muss das Blech am unteren Werkzeug fest angedrückt werden, so dass möglichst wenige Schwingungen auftreten. Während der Fertigung zieht der Werker das bereits umgeformte Blech aus den Werkzeugen heraus und vergleicht es mit einer Schablone. Damit kann er aufgrund eigener Erfahrungen entscheiden, an welchen Stellen mit welcher Schlagstärke das Blech zu der Zielgeometrie geformt werden soll, um die Zielgeometrie zu erreichen.

#### **5.1.1.1 Aufzeichnung der Bauteilführung durch das Tracking**

Um die Schlagpositionen im manuellen Fertigungsprozess zu erfassen, kommt das markerbasierte Trackingsystem zum Einsatz (siehe Abschnitt 4.2.1). Dabei steht ein Markerbaum mit drei Markern, der auf einem Gestell befestigt ist, zur Verfügung. Prinzipiell kann der Markerbaum auf dem umzuformenden Blech fixiert werden. Unter Berücksichtigung einer späteren, robotergeführten Fertigung wird jedoch die Transformation der Trackingdaten vom Blech- ins Roboterkoordinatensystem schwierig, da eine aufwendige manuelle Kalibrierung zwischen den beiden Koordinatensystemen durchgeführt werden muss. Deshalb wird der Markerbaum auf dem speziell für diese Forschungsarbeit entwickelten Greifer festgeschraubt.

Bei der manuellen Bauteilführung wird zuerst das Blech in den Greifer eingeklemmt und dann der Greifer mit dem Markerbaum vom Werker in die Hand genommen.

Beim Tracking können starke Schwingungen durch die Stößelbewegung erzeugt werden, was die Fertigungsgenauigkeit stark beeinflusst. Eine systematische Ermittlung der Genauigkeit bei der Aufnahme ist ohne weitere Hilfsmaßnahmen nicht möglich. Um die Aufnahmegenauigkeit erhöhen zu können, wird eine Vorschrift für die manuelle Führung des Bleches erstellt, damit der Werker das Bauteil genügend genau im Kraftformer führt. Um möglichst wenig Schwingungen anzuregen, soll das Blech mit seiner Tangentialfläche parallel zur Werkzeugoberfläche fest an das Werkzeug angeedrückt werden. Dazu braucht der Werker bei jeder Schlagposition 2–4 Sekunde, um ein Bauteil relativ zum Werkzeug optimal zu positionieren.

Sobald das Trackingsystem den Markerbaum im Sichtbereich erkennt, kann die Bauteilführung mit der Trackingrate aufgezeichnet werden (siehe Abbildung 5.2).

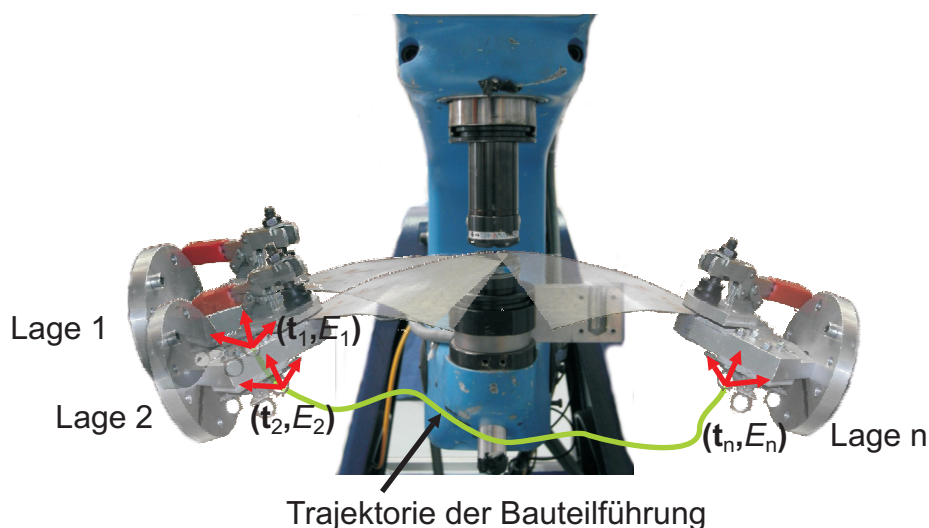


Abbildung 5.2: Aufzeichnung der Bauteilbewegungen mittels des Trackingsystems. Gespeichert werden die Trajektorien im Kamerakoordinatensystem. Die Lage des Bleches entspricht der Schlagposition.



Während des Trackings beleuchtet die Trackingkamera den Arbeitsbereich mit Infrarotlicht. Das Licht wird durch die reflektierende Oberfläche, z. B. von einem Marker, zurück zur Kamera gespiegelt. Die Kamera verarbeitet die Lichtsignale mit dem integrierten IPP (engl.: „Image Processing Program“), woraus die dreidimensionalen Koordinaten für den Marker resultieren. Daraus ergibt sich eine Koordinatenfolge der Lage des umzuformenden Bleches  $\{(t_k, E_k) \mid k = 1, 2, \dots, n\}$ . Wenn das Bauteil während des Fertigungsprozesses immer an der gleichen Position im Greifer fest eingeklemmt wird, können die jeweils erfassten Markerpositionen ebenfalls eindeutig den Schlagpositionen zugeordnet werden.

#### **5.1.1.2 Synchronisierung der Schlagposition und -stärke**

Eine inkrementelle Umformoperation erfolgt an einer Schlagposition durch Auslösen eines Schlages. Die Schlagposition und -stärke als Prozessparameter wird sowohl im manuellen als auch im roboterunterstützten Umformprozess bei jeder Umformung gleichzeitig benötigt. Eine Synchronisierung kann am Kraftformer nur im Einzelhub-Modus realisiert werden. Wie in 4.1.1 erwähnt, kann der Einzelschlag über eine serielle Verbindung (*RS232*) gesteuert ausgelöst werden. Mit der Steuerung dauert ein Einzelschlag des Kraftformers bis zu einer halben Sekunde. Dadurch kann eine Synchronisierung mit dem Trackingsystem zeitnah erfolgen.

Aus dem getriggerten Fußpedal empfängt der Leitreechner ein Signal und sendet zeitgleich ein Signal zum Trackingsystem und eines an den Kraftformer. Danach meldet das Trackingsystem mittels einer seriellen Verbindung *RS232* die getrackte Marker- bzw. Schlagposition sofort zurück an den Rechner. Genau zu diesem Zeitpunkt führt der Kraftformer die Befehle aus dem Steuersignal aus, gibt aber keine Rückmeldung zum Steuerrechner. Dieser Synchronisierungsprozess wird in Abbildung 5.3 dargestellt.

In diesem Synchronisierungsprozess können die Stößelbewegungen aufgrund der resultierenden Schwingungen die zu erfassenden Schlagpositionen stark beeinflussen. Es ist daher erforderlich, dass die Bleche beim Stauchen fest am unteren Stauchwerk-

zeug angedrückt werden. Anderenfalls kann die Roboter-Kraftformer-Einheit den manuellen Umformprozess nur schlecht nachbilden.

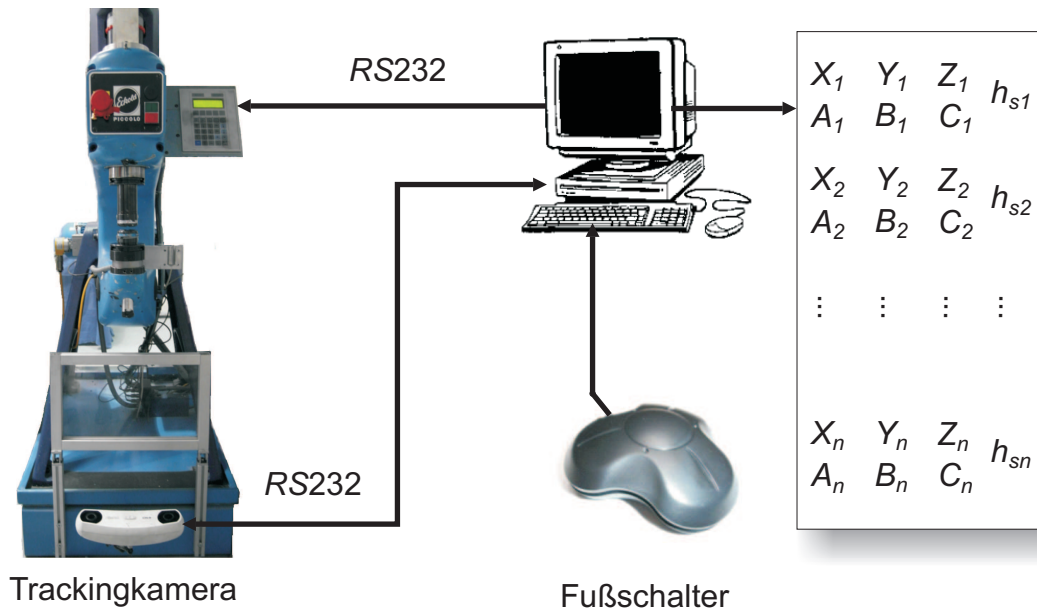


Abbildung 5.3: Durch eine Betätigung des Fußschalters werden ein Einzelschlag ausgelöst und gleichzeitig die Trackingdaten erfasst. Die Ausgabe nach der Synchronisierung hat das Format:  $(X, Y, Z, A, B, C, h_s)$ .

### 5.1.2 Extrahieren der Umformtrajektorie

Mit dem implementierten Trackingsystem werden beim manuellen Prozess die Bauteilbewegungen aufgezeichnet. Sie enthalten die einzelnen Schlagpositionen entlang der diskreten Trackingzeitachse. Eine solche Schlagposition wird durch das lokale Markerkoordinatensystem von getrackten Markern eindeutig abgebildet, solange die relative Lage zwischen Blech und Markerbaum am Greifer unverändert bleibt.

In dem erfassten Fertigungsdatensatz wurden die Bahndaten in mehreren Zeilen mit dem Format (Translationen:  $X_R, Y_R, Z_R$ ; Rotationen:  $A_R, B_R, C_R$ ) geschrieben. Jede Zeile bezeichnet einen Stoppunkt, bei dem eine Stauchoperation mit einer zugehörigen Schlagstärke ausgelöst wird. Aber nicht alle erfassten Bauteilbewegungen sind mit den Schlagstärken synchronisiert. Wenn beispielsweise der Werker das Blech aus dem

Werkzeug zieht und mit einer Schablone vergleicht, werden die Bauteilbewegungen aufgenommen, obwohl ihnen keine Schlagstärken zugeordnet sind. Die Schlagstärke in dieser Zeile beträgt deshalb null. Aus den Bewegungspfaden müssen die Umformtrajektorien für das Nachfahren des Roboters extrahiert werden, damit sich der Roboter lediglich auf die Führung des Bleches zur Umformposition beschränkt. Da solche Bewegungen bereits durch die synchronisierten Stauchoperationen gekennzeichnet wurden, werden die Umformtrajektorien ausschließlich durch die Schlagpositionen mit den zugehörigen Schlagstärken ( $\neq 0$ ) beschrieben.

### **5.1.3 Transformation der Bauteilbewegungen mittels der Roboter-Kamera-Kalibrierung**

Die Koordinatentransformation findet direkt zwischen der Trackingkamera und dem Roboter statt, wobei das Roboter- (RKS) und Kamerakoordinatensystem (CKS) zur Darstellung der Bauteilbewegungen ausreichend sind. Diese Transformationsmethode ist als *Roboter-Kamera-Kalibrierung* (engl.: „Hand-Eye-Calibration“) bekannt [Park1994]. Das Ziel dieser Methode ist die Ermittlung der Transformationsmatrix  $Q$ .

Das Prinzip der Kalibrierung bedeutet in der Realität, dass eine Objektbewegung im Raum von keinem Koordinatensystem abhängig ist und daher in verschiedenen Koordinatensystemen beschrieben werden kann. Somit existiert für die Bewegungsdarstellungen ein gewisser Zusammenhang zwischen den unterschiedlichen Koordinatensystemen. Um diesen Zusammenhang zwischen CKS und KKS herauszufinden, werden hierbei mehrere Koordinatenpaare jeweils in den beiden Koordinatensystemen benötigt.

Dieser Kalibrierungsvorgang kann durch die Ansteuerung des KUKA-Roboters automatisch erreicht werden. Dafür wird eine Koordinatenliste mit dem Robotersteuerungsdatenformat (Translationen:  $X_R, Y_R, Z_R$ ; Rotationen:  $A_R, B_R, C_R$ ) im RKS erstellt. Alle Koordinaten in der Liste sollen sich gleichverteilt im Sichtbereich der Trackingkamera befinden und werden im Raum stochastisch generiert. Der Roboter fährt dann zu jedem Punkt der Liste, wobei die Lageinformationen des Greifers aus dem Tracking-

system zeitgleich mit den Koordinaten des Punktes zu Koordinatenpaaren kombiniert werden. Mithilfe homogener Matrizen können die Koordinatenpaare wie folgt dargestellt werden:

$$(H_{R0}, H_{C0})(H_{R1}, H_{C1}) \cdots (H_{Rn}, H_{Cn}). \quad (5.1)$$

Eine homogene Matrix enthält einen Translationsvektor und eine Rotationsmatrix:

$$H_R = \begin{pmatrix} R_R & \mathbf{t}_R \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, H_C = \begin{pmatrix} R_C & \mathbf{t}_C \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5.2)$$

Für den Translationsvektor gilt  $\mathbf{t}_R = (X_R, Y_R, Z_R)$  und  $\mathbf{t}_C$  bezeichnet den Ursprung des Markerkoordinatensystems (MKS). Die Rotationsmatrix  $R_R$  resultiert aus den Eulerwinkeln ( $A_R, B_R, C_R$ ) und wird in Abschnitt 4.1.2 hergeleitet. Aus den erfassten Lageinformationen wird  $R_C$  als Achsenmatrix des Markerkoordinatensystems gekennzeichnet. Das erste Koordinatenpaar in der Liste wird als Basiskoordinatenpaar genommen, damit alle folgenden Rotationen und Translationen von dieser Lage aus vergleichbar im RKS und CKS beschrieben werden können. Bezüglich der Basiskoordinaten ( $H_{R0}, H_{C0}$ ) werden die neuen Koordinatenpaare wie folgt berechnet:

$$H_{Rj} = \begin{pmatrix} R_{Rj} \cdot R_{R0}^{-1} & \mathbf{t}_{Rj} - R_{Rj} \cdot R_{R0}^{-1} \cdot \mathbf{t}_{R0} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, H_{Cj} = \begin{pmatrix} R_{Cj} \cdot R_{C0}^{-1} & \mathbf{t}_{Cj} - R_{Cj} \cdot R_{C0}^{-1} \cdot \mathbf{t}_{C0} \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5.3)$$

Aufgrund der Vergleichbarkeit der Bewegungsdarstellung zwischen RKS und CKS wird die Gleichung zwischen den Koordinaten der Bewegungskurven  $H_{Rj}$  und  $H_{Cj}$  im CKS und RKS mithilfe der Transformationsmatrix  $Q$  aufgestellt:

$$H_{Rj} \cdot Q = Q \cdot H_{Cj}, \quad (5.4)$$

$$Q = \begin{pmatrix} R_Q & \mathbf{t}_Q \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (5.5)$$

[Park1994] zeigt einen *Least-Square*-Lösungsweg, der aus den zwei zu optimierenden Kriterien besteht:

$$\eta_1 = \sum_{i=1}^n \|R_Q \cdot \chi_i - \rho_i\|^2, \quad (5.6)$$

$$\eta_2 = \sum_{i=1}^n \|(R_{Ri} - I) \cdot \mathbf{t}_Q - R_Q \cdot \mathbf{t}_{Ci} + \mathbf{t}_{Ri}\|^2, \quad (5.7)$$

$$\rho_i = \log R_{Ri},$$

$$\chi_i = \log R_{Ci}.$$

Durch das Minimieren von  $\eta_1$  und  $\eta_2$  werden die Rotationsmatrix  $R_Q$  und der Translationsvektor  $\mathbf{t}_Q$  als die zwei Bestandteile der Transformationsmatrix  $Q$  ermittelt. Die Herleitung befindet sich im Anhang 8.1.

Unter Zuhilfenahme der ermittelten Transformationsmatrix  $Q$  können die extrahierten Bauteilbewegungen bzw. Umformtrajektorien ins RKS transformiert werden (siehe Abbildung 5.4).

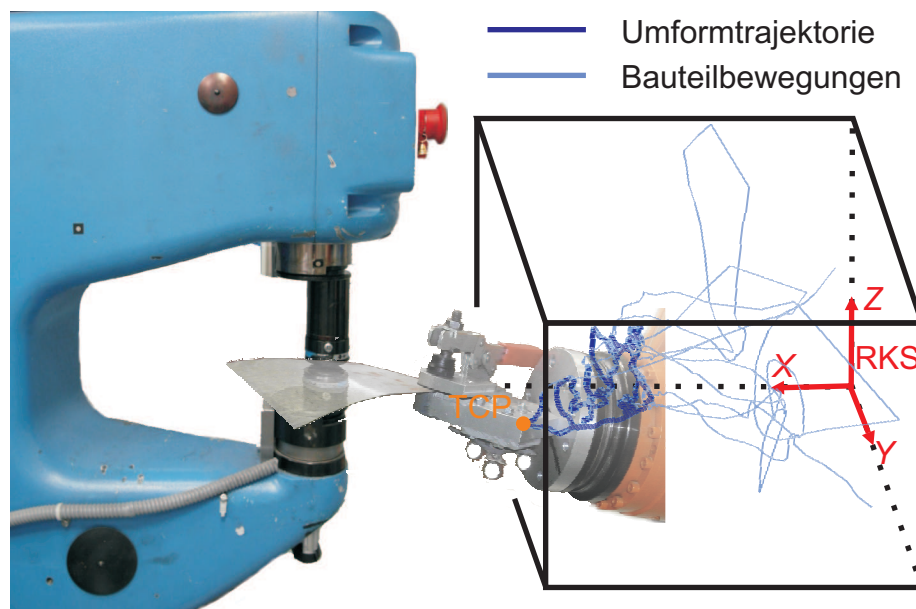


Abbildung 5.4: Extrahierte Umformtrajektorien (rot) und die erfassten Bauteilbewegungen (blau) des TCP („Tool Center Point“) im Roboterkoordinatensystem (RKS).

Die so weit transformierte bzw. kopierte Bauteilführung bezeichnet auch das zu fahrende Manöver des TCP („Tool Center Point“) des Roboters.

## 5.1.4 Generierung der Steuerungsdaten zur automatisierten Fertigung

### 5.1.4.1 Ausführbare Steuerungsdaten

Nach der Extrahierung der Umformtrajektorien gehen die Stützpunkte von einem zum anderen Stoppunkt verloren. Dadurch kann es zu einer ungeplanten Kollision zwischen Blech und Werkzeug kommen, auch wenn zwei Stoppunkte direkt aufeinander folgen, aber die Distanz zwischen den beiden zu groß ist. Obwohl eine lineare oder eine „point-to-point“-Bahnsteuerung vom KUKA-Roboter automatisch ausgeführt werden kann, ist es jedoch möglich, dass es durch eine hohe Verfahrensgeschwindigkeit des Roboters in Kombination mit einer nicht genau bekannten Krümmung des Bleches in einer starken Stoßbelastung zwischen Blech und Werkzeug kommt. Somit kann das Blech verkanten und langsam aus dem Greifer herausgezogen werden. Damit stimmt das Blechkoordinatensystem (BKS) nicht mehr mit dem Greiferkoordinatensystem (GKS) überein, was zu einer mangelhaften Kopiergenauigkeit führt. Dieses Problem kommt ursprünglich aus dem Extrahieren der Bauteilbewegungen und verlangt somit das Hinzufügen von Stützpunkten. Die extrahierten Umformtrajektorien werden interpoliert, wenn die Schrittweiten von je zwei nacheinander liegenden Stoppunkten größer als ein vorbestimmter Wert sind. Eine feste angemessene Schwelle wird für die Interpolation vorgegeben, durch die die nachfolgend beschriebenen kritischen Situationen in der Praxis häufig reduziert werden konnten. Hierbei wird die Spline-Interpolation für eine glatte Bauteilführung angewendet [Farin1996].

So weit sind die primitiven Steuerungsdaten zur automatisierten Blechfertigung generiert. Zur Umsetzung des Bewegungsablaufs von Kraftformer und Roboter muss überprüft werden, ob

- der Roboter bestimmte Positionen nicht erreichen kann,
- der Greifer gegen das Werkzeug stoßen kann,
- so große Reibkräfte zwischen Blech und Werkzeug erzeugt werden können, dass das Blech nicht aus dem Greifer gezogen werden kann.

Sofern mindestens einer der drei Fälle zutrifft, muss der Schritt *Durchführung manueller Blechfertigung* wiederholt werden, wobei der Werker besonderes Augenmerk auf die Position des Greifers bzw. des Bleches relativ zum Werkzeug richten muss.

#### 5.1.4.2 Spiegelung der Bahndaten für symmetrische Bauteile

In diesem Abschnitt geht es um eine Optimierungsmöglichkeit bei symmetrischen Bauteilen. Ausgehend von den Stauchwerkzeugen mit ebenen Oberflächen kann sich das Blech bei der ersten Stauchoperation mit gleicher Wahrscheinlichkeit nach beiden Seiten biegen. Wenn die Biegung zu einer bestimmten Seite gewünscht wird, muss eine einseitige Spannkraft oder eine Schiefstellung des Bleches relativ zu der Werkzeugebene, erzeugt werden. Diese gezielte Einrichtung der gewünschten Biegerichtung ermöglicht die Herstellung symmetrischer Bauteile. Dazu wird die Umformtrajektorie des einen Bauteils zur Fertigung des anderen um eine Ebene gespiegelt.

In Abbildung 5.5 wird beim ersten Schritt der Greifer um die horizontale Ebene gespiegelt. Sei  $E_{G3} = (\mathbf{e}_1, \mathbf{e}_2, \mathbf{e}_3)$  die Achsenmatrix des Greiferkoordinatensystems, ergibt sich  $\hat{E}_{G3}$  als gespiegelte um die waagerechte Spiegelebene:

$$\hat{E}_{G3} = \begin{pmatrix} \mathbf{e}_1 - 2\mathbf{n} \cdot (\mathbf{e}_1 - \mathbf{p}_0) \cdot \mathbf{n} \\ \mathbf{e}_2 - 2\mathbf{n} \cdot (\mathbf{e}_2 - \mathbf{p}_0) \cdot \mathbf{n} \\ \mathbf{e}_3 - 2\mathbf{n} \cdot (\mathbf{e}_3 - \mathbf{p}_0) \cdot \mathbf{n} \end{pmatrix}^T \quad (5.8)$$

$\mathbf{p}_0$  : Ein bekannter Punkt in der Spiegelebene,

$\mathbf{n}$  : Die Normale der Spiegelebene.

Beim zweiten Schritt muss eine Drehspiegelung um die Z-Achse weitergeleitet werden, so dass vom Roboter nicht ausführbare Orientierungen des TCP („Tool Center Point“-Koordinatensystems) vermieden werden. Die X- und Y-Achse werden in der X-Y-Ebene um einen Winkel  $\phi$  gedreht:

$$\hat{E}_{G2} = \begin{pmatrix} -\sin \phi & \cos \phi \\ \cos \phi & \sin \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{e}_1 \\ \mathbf{e}_2 \end{pmatrix} \quad (5.9)$$

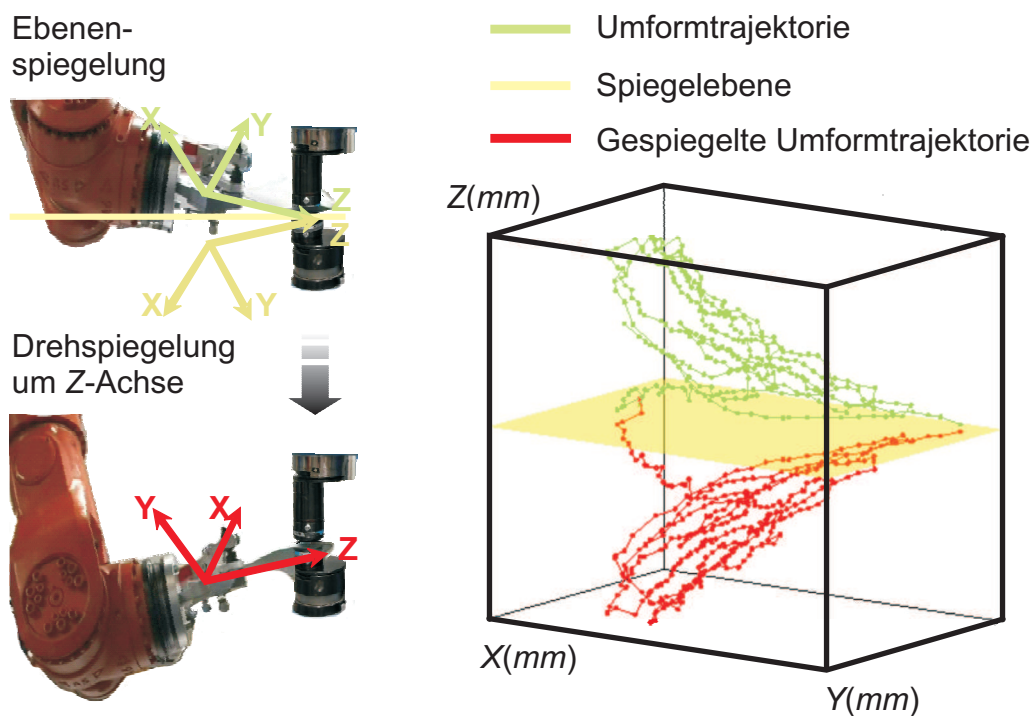


Abbildung 5.5: Links: Spiegelung des Greiferkoordinatensystems durch Ebenen- und Drehspiegelungen. Rechts: Umformtrajektorie, Spiegelebene und gespiegelte Umformtrajektorie.

Nach den zwei Spiegelungsschritten ergibt sich die gespiegelte Umformtrajektorie (siehe Abbildung 5.5). Somit wird für symmetrische Bauteile die Hälfte der manuellen Arbeiten eingespart.

## 5.2 Analyse des Kopierverfahrens

Hierbei werden die manuelle Bauteilführung und die Roboter-Kamera-Kalibrierung, die letztendlich die Fertigungsgenauigkeit beeinflussen, untersucht.

### 5.2.1 Aufzeichnung der manuellen Bauteilführungen

#### 5.2.1.1 Versuchsdefinition und -durchführung

Bei Tracking der manuellen Bauteilführungen müssen viele Messungen der Marker bzw. des Markerbaums durchgeführt werden, damit die Messunsicherheiten vernachlässig-



bar klein werden. Zur Beurteilung dieser Messunsicherheit werden die gemittelten Abstandsabweichungen in Translation und Rotation als Streuungsmaße definiert:

$$\Delta V = \frac{1}{N} \sum_N \sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}, \quad (5.10)$$

$$\Delta D = \frac{1}{N} \sum_N \sqrt{\Delta A^2 + \Delta B^2 + \Delta C^2}. \quad (5.11)$$

Die Abweichungen kennzeichnen die gemittelten Abstände der Translationen und der Rotationen zwischen der gemessenen und der gemittelten Position des Markerbaums nach vielen Messungen.

Bei der Durchführung steht der Markerbaum still vor der Trackingkamera, bis 1000 Messungen erfolgt sind. Den Datensatz exportiert das selbst entwickelte Programm *TreibTec* (siehe Abschnitt 4.3).

### 5.2.1.2 Versuchsergebnisse

Aufgrund unvermeidbarer Maßtoleranzen streuen die vermessenen Markerpositionen um die echten Marker (siehe Abbildung 5.6). Obwohl der Marker eine kugelförmige Oberfläche hat, bildet die Punktwolke jedoch ein Ellipsoid. Dies bedeutet ungleichmäßige Streuungen in  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ -Richtung und führt deshalb zu Abweichungen in den drei Richtungen.

Abbildung 5.7 zeigt die Abstandsabweichungen entlang der Anzahl der Messungen ( $n_M$ ). Die Streuungsmaße  $\Delta V$  und auch  $\Delta D$  (siehe Gleichung 5.10 und 5.11) sinken tendenziell mit steigender Anzahl an Messungen und schwanken leicht aufgrund ungleichmäßiger Koordinatenstreuungen. Ein starker Abfall der Maße kann bei weniger als 50 Messungen erreicht werden. Ab 200 Messungen ändern sie sich nur um ein vernachlässigbares Maß.

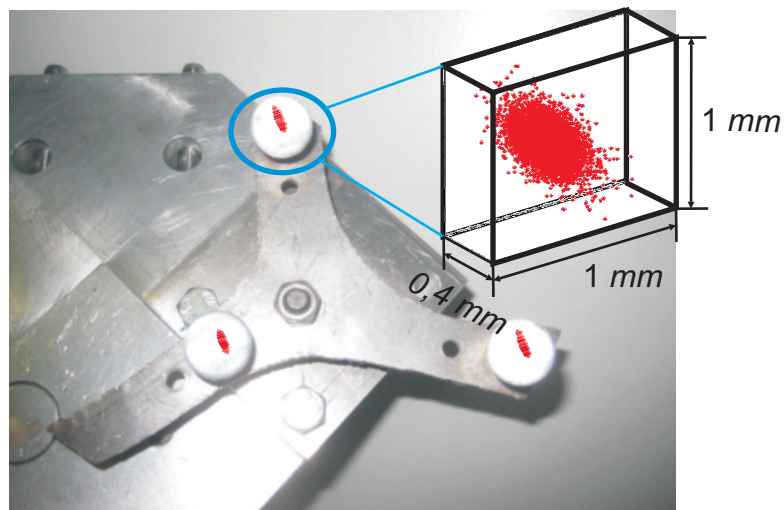


Abbildung 5.6: Messpunktswolken um den jeweiligen Marker mit ungleichmäßigen Streuungen in X, Y, Z-Richtung.

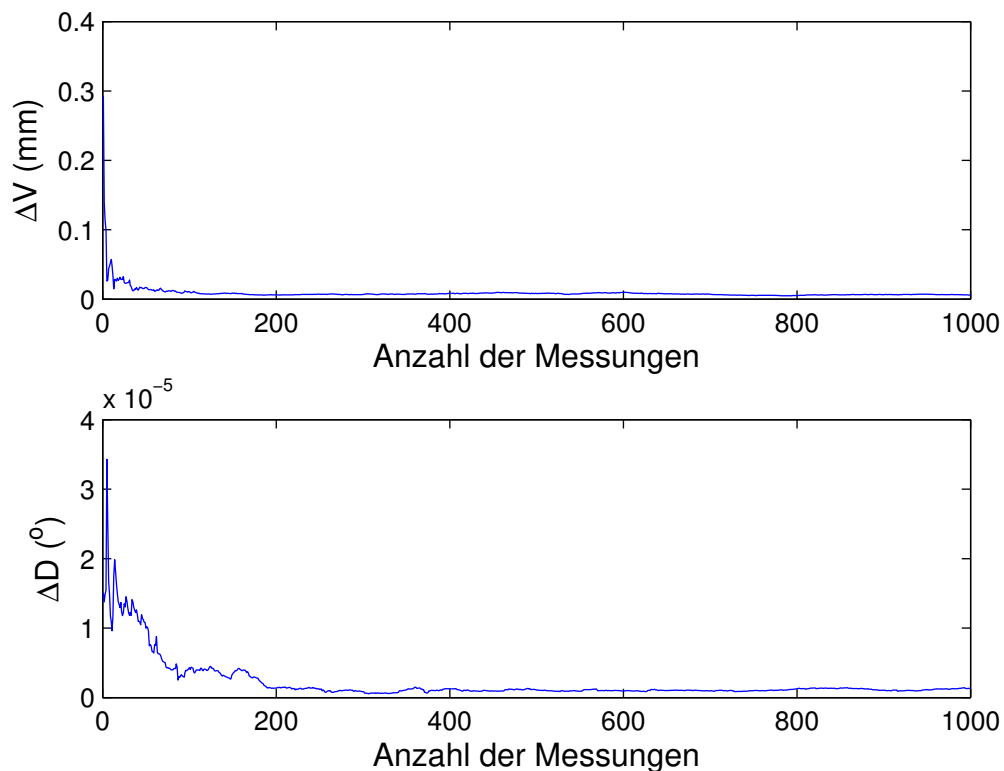


Abbildung 5.7: Abstandsabweichungen  $\Delta V$  und  $\Delta D$  entlang der Anzahl ( $n_M$ ) an Messungen des Markerbaums.

In der Praxis muss die Erfassung der Schlagpositionen mit den Schlagstärken synchronisiert werden. Die Synchronisierung darf erst nach der Stauchoperation erfolgen, weil die durch das Schlagen verursachten Schwingungen die aktuelle Schlagposition verändern und daher die Erfassungsgenauigkeit stark reduzieren kann. Wie in Abschnitt 5.1.1.2 erwähnt, dauert eine Betätigung der Stauchoperation nur etwa eine halbe Sekunde. Da eine Messung etwa 50 ms dauert, können an der gleichen Schlagposition maximal 10 Messungen durchgeführt werden. Sodann liegt  $\Delta V$  bei etwa 0,05 mm und  $\Delta D$  0,00002°. Zur Erhöhung der Erfassungsgenauigkeit muss ein anderes Tracking-system mit einer höherer Messgenauigkeit bzw. Datenverarbeitungsgeschwindigkeit verwendet werden.

## 5.2.2 Ausführung der Roboter-Kamera-Kalibrierung

### 5.2.2.1 Versuchsdefinition und -durchführung

Im Abschnitt 5.1.3 wurde aus den Koordinatenpaaren  $(H_{Rj}, H_{Cj})$  die Transformationsmatrix  $Q$  ermittelt. Mit  $Q$  und  $H_{Cj}$  kann eine neue Koordinatenmatrix  $\tilde{H}_{Rj}$  mit der Gleichung 5.4 berechnet werden. Aus  $\tilde{H}_{Rj} - H_{Rj}$  ergeben sich die Abweichungen  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z; \Delta A, \Delta B, \Delta C)$  in Translation und Rotation. Translatorische und rotatorische Kalibrierungsabweichungen ( $\Delta V$  und  $\Delta D$ ) werden mithilfe der Gleichungen 5.10 und 5.11 ermittelt.

Die Kalibrierung erfolgt am Roboter und Trackingsystem automatisch. Der Roboter fährt zu den Lagen, die im Messvolumen des Trackingsystems auf der Translation und auch der Rotation stochastisch gleichverteilt sind. Jeder Lage wird ein *Kalibrierpunkt* zugeordnet. Die dazu benötigten Steuerungsdaten, die alle Kalibrierpunkte beinhalten, werden vom Programm *TreibTec* generiert. Die im letzten Abschnitt beschriebene Messunsicherheit der Trackingkamera beeinflusst ebenso die Kalibrierungsgenauigkeit. Daher werden die Versuche jeweils mit den folgenden Parametern durchgeführt.

Anzahl der Kalibrierpunkte $n_K$	5	10	15	20	25	30	
Anzahl der Messungen $n_M$	1	5	10	20	30	40	50
	100	150	200	250	300	350	400

*Tabelle 5.1: Variation der Kalibrierungsparameter  $n_K$ : Anzahl der Kalibrierpunkte und  $n_M$ : Anzahl der Messungen um einen Kalibrierpunkt zur Untersuchung der Kalibrierungsgenauigkeit*

Die Anzahl der Versuche beträgt  $6 \times 14 = 84$ . Bei jedem Versuch wird die Laufzeit des Kalibrierungsvorgangs gemessen.

### 5.2.2.2 Versuchsergebnisse

In Abbildung 5.8 wird die Kalibrierungsgenauigkeit durch die Abstandsabweichungen  $\Delta V$  und  $\Delta D$  in Abhängigkeit von der Anzahl der Kalibrierpunkte  $n_K$  und Messungen  $n_M$  dargestellt.

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die translatorische Abweichung  $\Delta V$  tendenziell mit steigender Anzahl an Kalibrierpunkten  $n_K$  sinkt. Besonders die translatorische Kalibrierabweichung  $\Delta V$  hat sich mit zunehmender Anzahl der Kalibrierpunkte von 5 auf 15 um ca. 50 % reduziert. Mit weiter steigender Anzahl der Messpunkte schwankt  $\Delta V$  zwischen 0,5 mm und 0,6 mm. Entlang der Achse von  $n_M$  bleibt die Abweichung  $\Delta V$  ab 10 Messungen fast konstant, d. h., die translatorische Kalibrierungsgenauigkeit ist unempfindlich gegen die Anzahl der Messungen um einen einzelnen Kalibrierpunkt. Im Vergleich dazu liegt die rotatorische Abweichung  $\Delta D$  allgemein unter  $0,25^\circ$ . Der Grund dafür ist, dass bei der Erfassungsgenauigkeit die Abstandsabweichungen von Anfang an gering sind (siehe Abbildung 5.7).

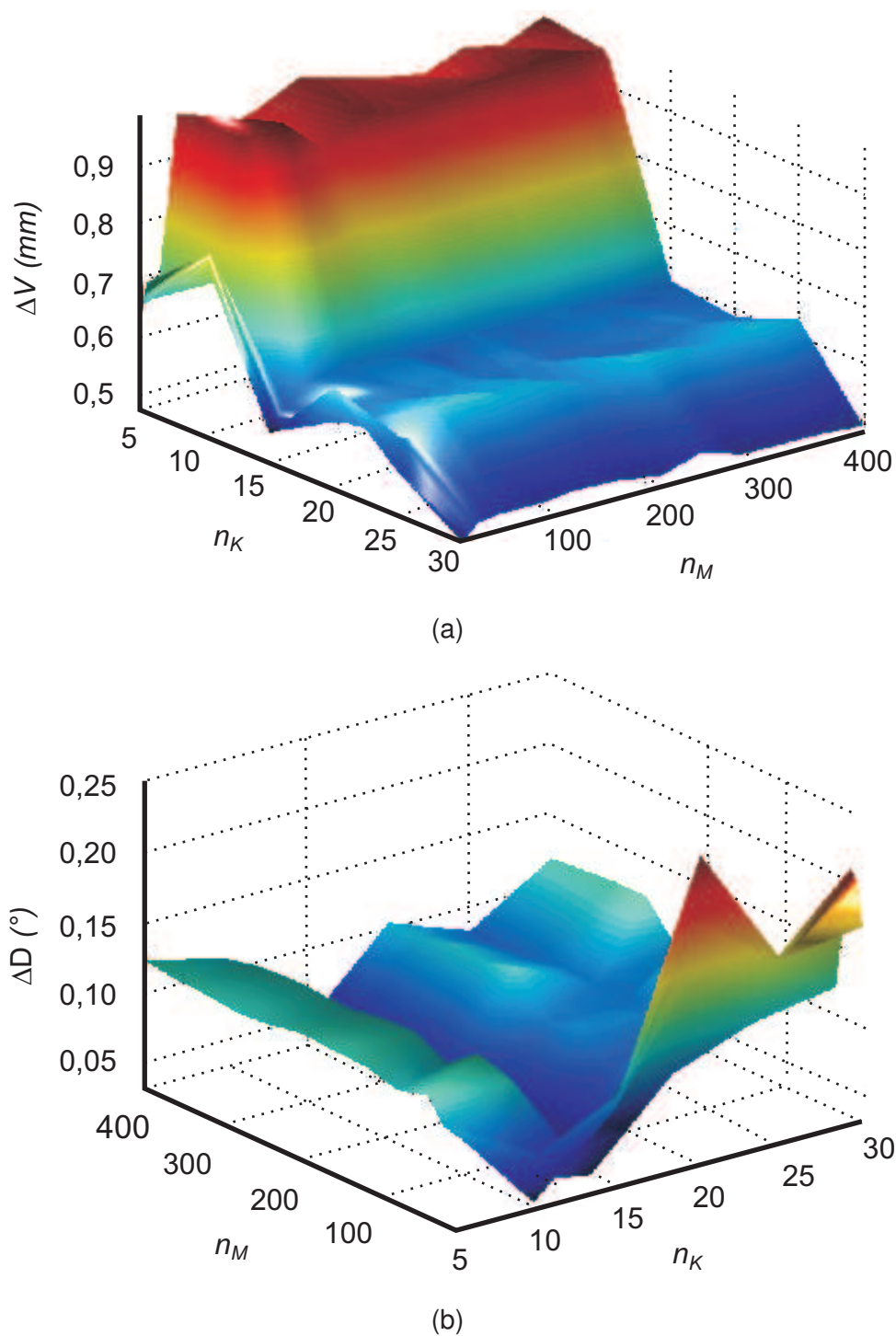


Abbildung 5.8: (a) Translatorische Kalibrierungsabweichung  $\Delta V$  und (b) rotatorische Kalibrierungsabweichung  $\Delta D$  in Relation zu der Anzahl der Kalibrierpunkte  $n_K$  und Messungen  $n_M$ .

Die Laufzeit der Kalibrierung steigt linear mit  $n_K$  und  $n_M$  an (siehe Abbildung 5.9).

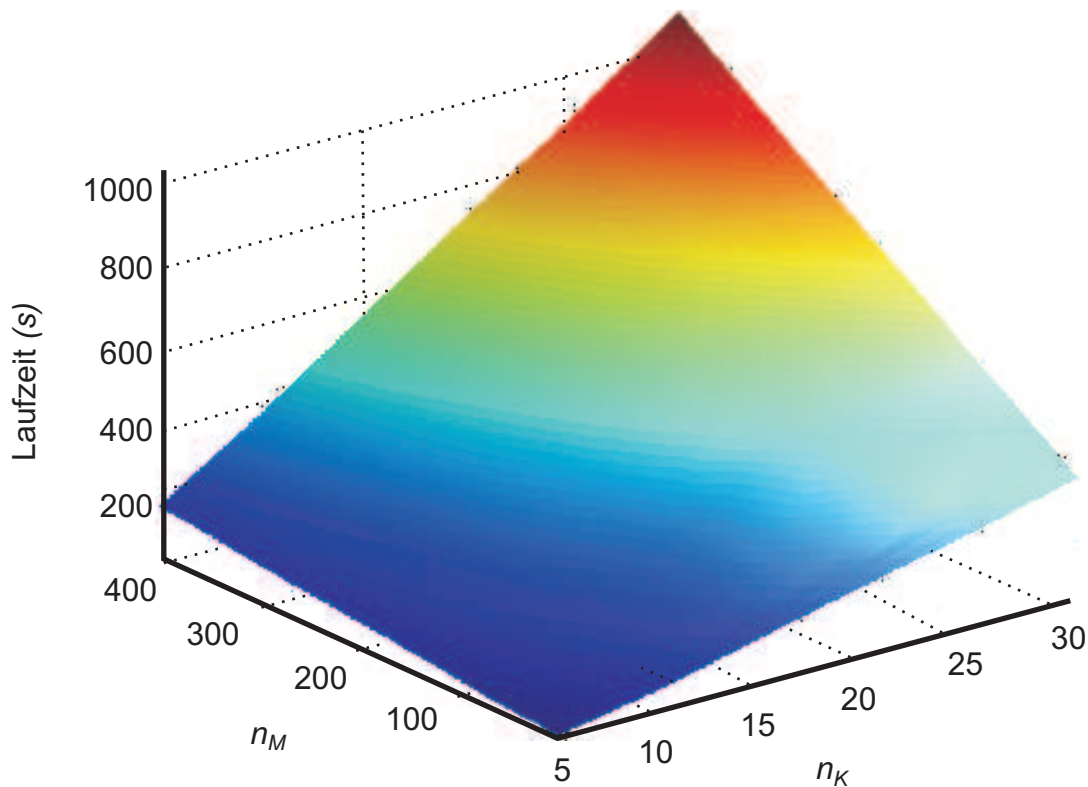


Abbildung 5.9: Laufzeit des Kalibriervorgangs in Relation zu der Anzahl der Kalibrierpunkte  $n_K$  und der Messungen  $n_M$ .

Der Kalibriervorgang muss für den gleichen Markerbaum erneuert werden, wenn die relative Position zwischen Kraftformer, Trackingsystem und/oder Roboter verändert würde. Bei dieser Neu-Kalibrierung spielt die Laufzeit in einer Ordnung von 5 *min* für den gesamten Aufwand des Fertigungsprozesses keine entscheidende Rolle.

## 5.2.3 Fertigungsgenauigkeit

### 5.2.3.1 Versuchsdefinition und -durchführung

Zur Evaluierung der Fertigungsgenauigkeit wird das Versuchsbauteil mit einer Ellipsoidoberfläche gewählt. Es repräsentiert das Bauteilspektrum mit vieleckiger Form, die als gleich doppelgekrümmtes Verkleidungsteil im Schienenfahrzeug- und Waggonbau im-

mer wieder eingesetzt wird (vergleiche Abbildung 2.3). Die Abbildung 5.10 zeigt die technische Zeichnung des Versuchsbauteils.

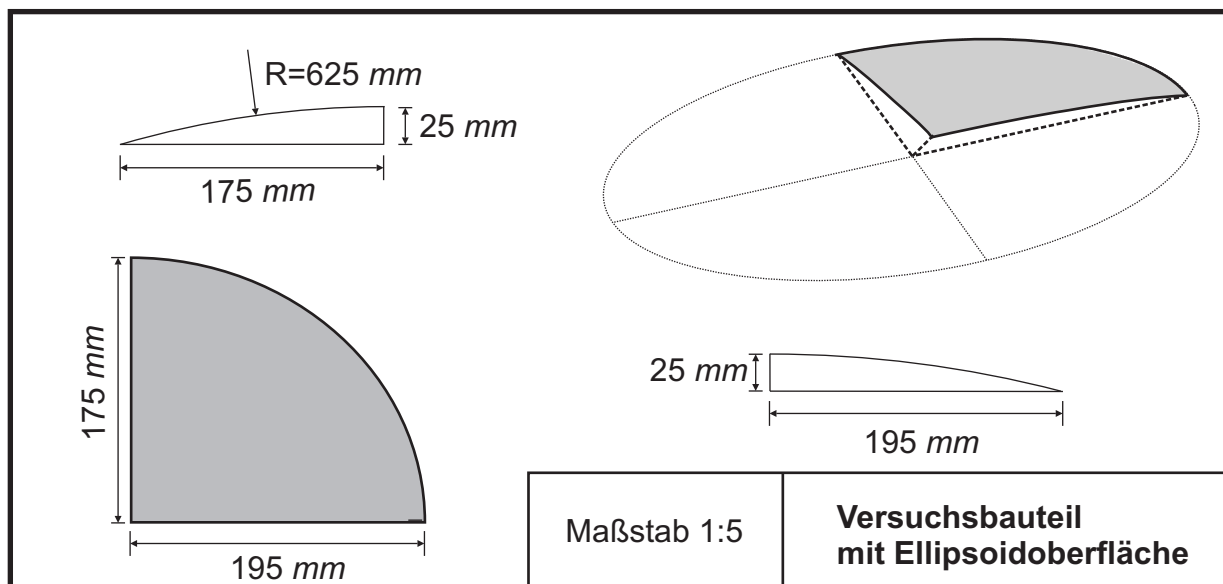


Abbildung 5.10: Abmessungen des Versuchsbauteils.

Das entsprechende Ausgangsblech hat eine elliptische Kontur mit den Halbachsenlängen von  $180\text{ mm}$  und  $200\text{ mm}$ . Als Material wurde der Werkstoff *DC04* ( $E = 210\text{ GPa}$ ,  $\nu = 0,3$ ,  $\rho = 7,94\text{ g/cm}^3$ ) mit einer Dicke von  $1,0\text{ mm}$  ausgewählt.

Wie beim Kopierverfahren beschrieben, werden zwei ebene Bleche manuell am Kraftformer umgeformt und währenddessen vom Trackingsystem getrackt. Aus der Roboter-Kamera-Kalibrierung ergibt sich die Transformationsmatrix jeweils mit einer unterschiedlichen Anzahl von Kalibrierpunkten. Nach der Transformation der Umformtrajektorien werden die jeweiligen Steuerungsdaten generiert, mit denen jeweils zweimal insgesamt vier weitere Bleche vom Roboter und Kraftformer automatisch gefertigt werden. Mit dem GOM ATOS-System wird die Geometrie von sechs Blechteilen vermessen. Anschließend erfolgt der Geometrievergleich zwischen den manuell und automatisch gefertigten Blechteilen. Dies gelingt mit der „Best-Fit“-Funktion der GOM-Software.

### 5.2.3.2 Versuchsergebnisse

Zur Beurteilung des Kopierverfahrens ist die Kopiergenauigkeit einer der wichtigsten Faktoren. Die Kopiergenauigkeit beschreibt die Geometrieabweichungen zwischen einem manuell und einem nach dem Kopierverfahren gefertigten Bauteil. Je größer die noch zulässige Geometrieabweichung des manuell gefertigten Musterbauteils von der Sollgeometrie ist, desto höher muss die Kopiergenauigkeit sein, um nicht aus dem Toleranzfeld der Fertigung herauszufallen. Wie Abbildung 5.8 zeigt, hängt allerdings die Kopiergenauigkeit hauptsächlich vom Kalibrierungsprozess ab. Hierzu zeigt Abbildung 5.11 die Beeinflussung der Kalibrierungsgenauigkeit auf die Kopiergenauigkeit.

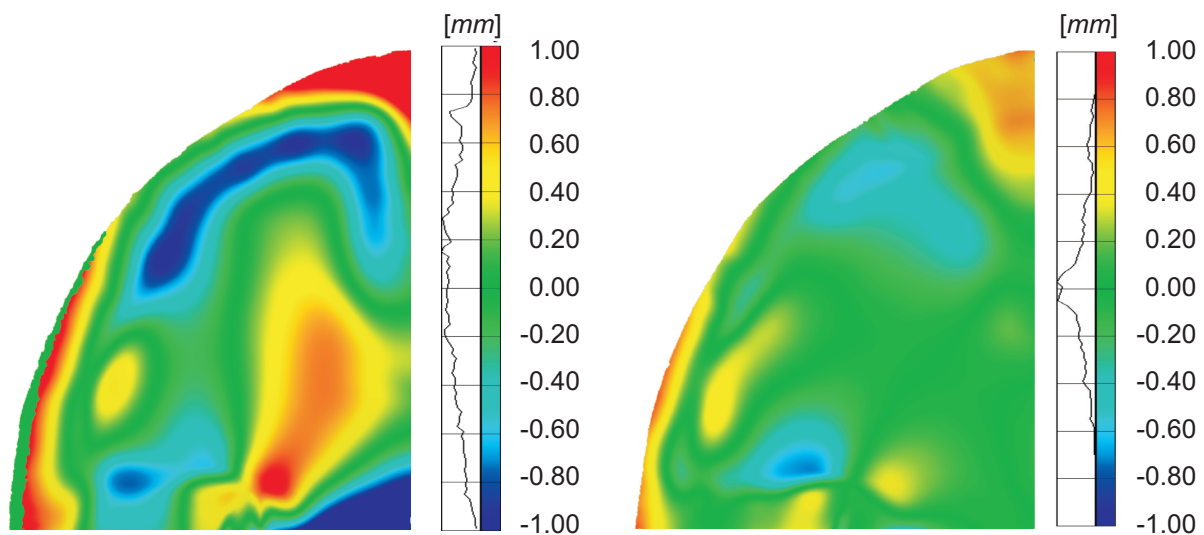


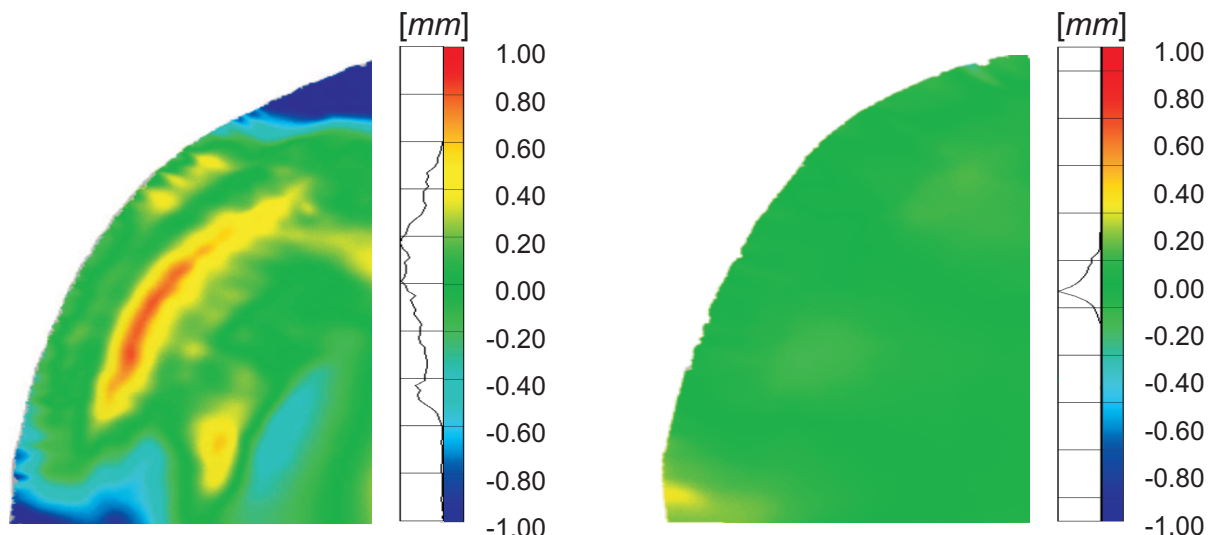
Abbildung 5.11: Kopiergenauigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Kalibrierpunkte  $n_k$  (links:  $n_k=10$ ; rechts:  $n_k=30$ ). Die Abweichungen werden von der Farbskala und dem Histogramm dargestellt.

Da die Kopiergenauigkeit stark von der Kalibrierungsgenauigkeit bzw. der Anzahl der Kalibrierpunkte abhängt, liegen die meisten Abweichungen des linken Bauteils im Wertebereich von -1 mm bis +1 mm, während die des rechten Bauteils bei -0,4 bis +0,4 mm liegen.

Das Kopierverfahren ist im Wesentlichen für die Kleinserienfertigung geeignet, wobei die Reproduzierbarkeit der robotergreifenden Fertigung von entscheidender Bedeutung



ist. Abbildung 5.12 zeigt die Geometrieabweichungen zwischen den zwei manuell bzw. den zwei robotergeriefend gefertigten Bauteilen.



*Abbildung 5.12: Abweichungen der Bauteiloberflächen zwischen links: zwei manuell gefertigten Bauteilen, rechts: zwei robotergeriefend gefertigten Bauteilen. Die Abweichungen werden von der Farbskala und dem Histogramm dargestellt.*

Eine bessere Reproduzierbarkeit bei der roboterunterstützten Blechführung ist zu erkennen, was auch das Bemühen um den Einsatz des Industrieroboters zur automatisierten Blechfertigung begründet. Sie wird von den Prozesswiederholgenauigkeiten beim Wiederanfahren der Roboterarme und durch eine Vielzahl der Schläge des Kraftformers beeinflusst und kann zu einer entscheidenden Verbesserung der Wiederholgenauigkeit führen (siehe Abbildung 5.12 (rechts)).

### 5.3 Schlussfolgerung

Das Kopierverfahren wurde in den vier Schritten detailliert beschrieben. Bei der Erfassung des manuellen Fertigungsprozesses wurde aufgrund der Streuungen der Trackingmarker die Erfassungsgenauigkeit der Marker untersucht. Die von 10 Messungen gemittelten Abstandsabweichungen  $\Delta V$  und  $\Delta D$  (in Verschiebung und Drehung) liegen jeweils bei 0,05 mm und 0,00002°. Eine höhere Genauigkeit kann prinzipiell durch ein

---

genaues Trackingkamarasystem mit einer schnelleren Datenübertragungsgeschwindigkeit erzielt werden.

Die Transformation der erfassten Bauteilbewegungen vom Kamera- ins Roboterkoordinatensystem erfolgte durch die Ermittlung der Transformationsmatrix aus der Roboter-Kamera-Kalibrierung. Er wurde bewiesen, dass die Kalibrierungsgenauigkeit von der Anzahl der Kalibrierpunkte abhängt. Um eine hohe Fertigungsgenauigkeit zu erreichen, müssen ausreichend viele Kalibrierpunkte gewählt werden.

Aus den transformierten Bauteilbewegungen wurden die ausführbaren Steuerungsdaten generiert. Mit dem vordefinierten Versuchsbauteil und dem Ausgangsblech wurden die Bauteile gefertigt und die ermittelte Kopier- bzw. Fertigungsgenauigkeit gezeigt. Da das Kopierverfahren für die Kleinserienfertigung geeignet ist, ist die Reproduzierbarkeit der roboterunterstützten Fertigung von großer Bedeutung. Die Versuchsergebnisse zeigen die höhere Reproduzierbarkeit bei der Fertigung mit dem Industrieroboter gegenüber der manuellen. Die Ergebnisse bestätigen die Potenziale einer automatisierten Fertigung mit dem Kraftformer.

Außerdem beschränkt sich der Kopierprozess nicht nur auf das *Kraftformerverfahren*, sondern ist aufgrund der Prozesskette *Tracking– Transformieren– Wiedergeben* verallgemeinerbar und auf jeden manuellen Fertigungsprozess übertragbar.

## 6 Verfahrensentwicklung durch Modellieren des manuellen Stauchens

In diesem Kapitel wird das modellbasierte Verfahren detailliert beschrieben und anhand des Stauchmodells bezüglich der Fertigungsgenauigkeit analysiert.

### 6.1 Verfahrensbeschreibung

Eine Vollautomatisierung des inkrementellen Stauchens wird auf Basis der Modellierung des Umformprozesses erreicht. Zu diesem Zweck wird zur Nachbildung der Blechgeometrieänderungen ein Stauchmodell erstellt. Basierend auf dem Stauchmodell werden zur Fertigung die Prozessparameter modellbasiert optimiert und anschließend in die reale Fertigungsumgebung transformiert. Daraus ergeben sich ausführbare Steuerungsdaten zur automatischen Bauteilfertigung. Der beschriebene Ablauf wird in Abbildung 6.1 veranschaulicht.

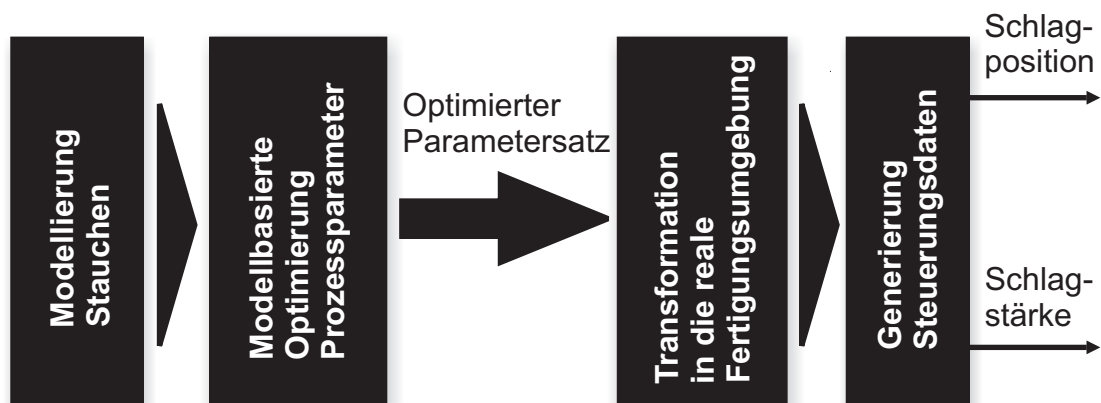


Abbildung 6.1: Prozessablauf der modellbasierten inkrementellen Blechumformung.

### 6.1.1 Modellierung des inkrementellen Stauchens

Die Simulation des inkrementellen Stauchens setzt ein Prozessmodell voraus, das die mit dem Stauchwerkzeug ausgeübte Umformung charakterisieren kann. Im Wesentlichen muss die Beziehung zwischen der Schlagstärke und der Geometrieänderung des Bauteils darstellbar sein.

Ein möglicher Lösungsansatz zur Modellierung stellt ein FEM-Modell dar. Diese Modellierungsmethode führt allerdings zu einem hohen Rechenaufwand, weshalb die Aufgabe der Generierung der Steuerdaten in dem erforderlichen Zeitfenster nicht gelöst werden kann. Beispielsweise benötigt in Pam-Stamp die Berechnung einer einzelnen Stauchoperation auf einem modernen PC (Intel Core 2 Quad Q6600 2,4 GHz und 4 GB RAM) schon etwa 50 min [Scherer2013], geschweige denn die Ermittlung der Schlagposition und -stärke aus der Zielgeometrie. Momentan ist kein kommerzielles FEM-Programm für die Aufgabenstellung geeignet.

Im Folgenden wird eine andere als FEM dargestellte Modellierung in vier Schritten beschrieben. Der erste Schritt ist die Idealisierung der Umformzone des umzuformenden Bleches. Diese Umformzone wird anschließend parametrisiert. Darauf aufbauend entsteht im dritten Schritt eine dreidimensionale Oberfläche des Bleches durch einen Einzelschlag. Des Weiteren dient das geometrische Stauchmodell auch zur Beschreibung der Geometrieänderung nach mehreren Stauchoperationen. Durch die Identifizierung der Modellkennlinien wird das Modell zur Simulation des Stauchens bereitgestellt.

#### 6.1.1.1 Idealisierung der Umformzone des umzuformenden Bleches

Eine Umformoperation des Stauchens erfolgt auf einem Blech durch die Umlenkung der vertikalen Pressenbewegung in eine horizontale Werkzeugbewegung. Die Werkzeugbacken halten das Blech fest und pressen das Material im Backenspalt zueinander. Die erzeugte Stauchung in der Umformzone hängt hauptsächlich von der Schlagkraft ab. Falls die Schlagkraft zu groß ist, kann das Material beispielsweise in der horizontalen Richtung nicht gestaucht, sondern faltig gepresst werden.

Weiterhin weist die Umformzone entlang des Spaltes verschiedene Verformungsgrade auf. Da eine größere Umformung näher im Bereich der Backenränder erreicht wird, nimmt die Umformzone eine Dreiecksgestalt an (siehe Abbildung 6.2).

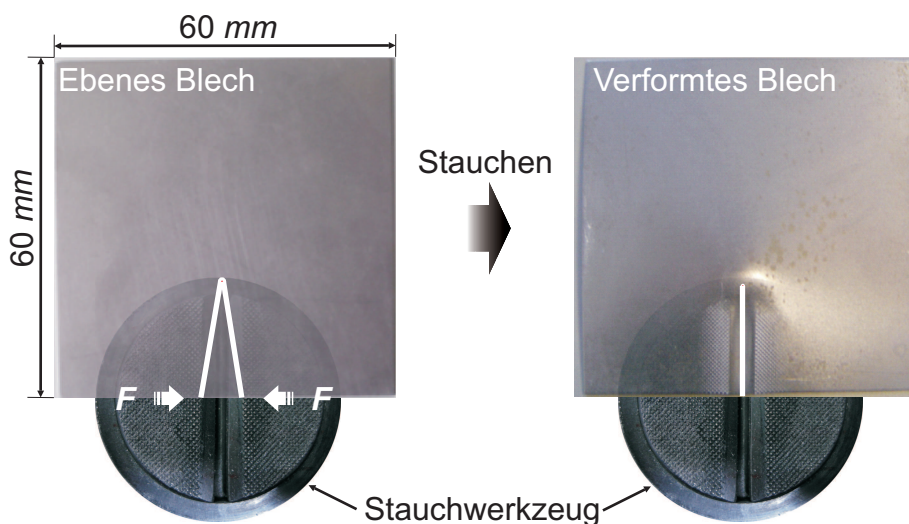


Abbildung 6.2: Links: Nach einem Stauchschlag verformt sich das ebene Blech. Die umzuformende Zone besitzt eine dreieckige Ausprägung. Rechts: Nach der Umformung fallen die beiden Dreieckschenkel zusammen.  $F$  ist die Umformkraft.

Idealerweise deckt die Umformzone ein gleichschenkliges Dreieck ab. Die beiden Dreieckschenkel fallen nach dem Stauchen parallel zum Backenspalt zusammen. Dieser Vorgang lässt das ebene Ausgangsblech eine 3D-Form annehmen. In der Realität führt die Verformung noch zu einer Dickenveränderung bzw. Materialverfestigung im Bereich der Umformzone. Es ändert sich ferner der Blechoberflächenreibungs- und Werkzeugverschleißzustand. Außerdem drücken bei weiteren Umformoperationen die Stauchwerkzeuge mit den flachen Backen das bereits dreidimensional verformte Blech um die Umformzone zuerst wieder flach und stauchen es dann in horizontaler Richtung. All diese Faktoren beeinflussen das Umformergebnis nachfolgender Schläge. Sie werden jedoch bei der geometrischen Modellierung vernachlässigt. Wie im Folgenden noch gezeigt wird, ist diese Vereinfachung durchaus zulässig.

Im folgenden Abschnitt wird die Parametrisierung der idealisierten Umformzone dargelegt, die für eine mathematische Beschreibung der Geometrieänderung benötigt wird.

### 6.1.1.2 Parametrisierung der Umformzone

Abbildung 6.3 (rechts) zeigt ein leicht umgeformtes Blech mit gekennzeichneten Umformzonen.

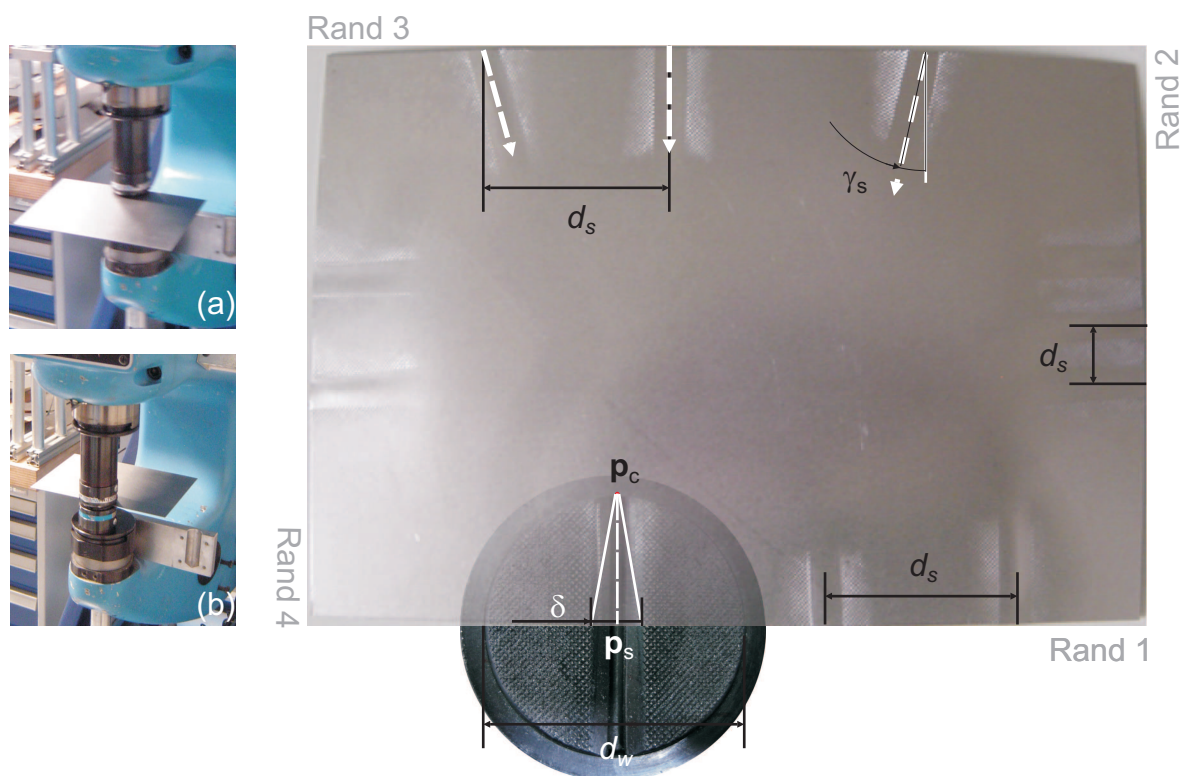


Abbildung 6.3: Links: Blech wird mit dem Stauchwerkzeug im Vorderteil (a) bzw. im Hinterteil (b) bearbeitet. Rechts: Parameter der Umformzone: Scheitelpunkt  $p_c$ , Basismittelpunkt  $p_s$  und Stauchung  $\delta$  sowie die Schlagausrichtung  $\gamma_s$ . Der Schlagabstand  $d_s$  bezeichnet den Abstand zwischen zwei nebeneinander ausgelösten Schlägen.  $d_w$  ist der Werkzeugbackendurchmesser.

Das viereckige Blech hat vier Ränder (von 1 bis 4), worauf die Schläge ausgelöst werden, um eine gewisse Umformung zu erreichen. Wegen der Zugänglichkeit des Werkzeugs am Kraftformer (siehe linke Abbildung) wird das Werkzeugvorderteil häufiger als

das Hinterteil genutzt, so dass unterschiedliche Verschleißzustände der Werkzeugoberflächen an den beiden Teilen vorkommen. Hierbei wird die Kombination vom Werkzeugteil und nummerierten Rand mithilfe des Parameters  $\kappa$  gekennzeichnet. Als Beispiel zeigt die folgende Abbildung das Schlagen durch das Hinterteil auf dem Rand 1 des Blechs, wobei  $\kappa = H1$  ist. Dieser Parameter dient der Festlegung der Schlagreihenfolge bei der robotergreifenden Fertigung.

An den Rändern des Bleches sind die dreieckigen Umformzonen zu erkennen. Die Positionen der Umformzonen sind durch den *Scheitelpunkt*  $\mathbf{p}_c$  und den *Basismittelpunkt*  $\mathbf{p}_s$  gekennzeichnet. Der Vektor  $\mathbf{p}_c\mathbf{p}_s$  bestimmt die auf den betreffenden Blechrand bezogene *Schlagausrichtung*. Der Abstand  $\|\mathbf{p}_s\mathbf{p}_c\|$  entspricht in der Abbildung der Länge der weiß gestrichelten Linie. Der Wert  $\|\mathbf{p}_s\mathbf{p}_c\|/d_w$  beschreibt die prozentuale Kontaktfläche des Werkzeugs bzw. die *Werkzeugüberdeckung*. Die *Stauchung*  $\delta$  hängt von der eingestellten Schlagkraft und dem verwendeten Werkstoff ab. Trotz des gleichen Werkstoffes und der gleichen Schlagkraft ändert sich die Stauchung bei jedem Schlag zusätzlich aufgrund der Verfestigung des Materials, der Rauigkeitsschwankung der Kontaktflächen und des Verschleißzustands der Werkzeuge. Die Wechselwirkung zwischen den Schlägen wird stärker, wenn der *Schlagabstand*  $d_s$  kleiner als der *Werkzeugdurchmesser*  $d_w$  ist, so dass sich dann die lokalen Umformbereiche der Bleche überlappen. Somit beeinflusst die Reihenfolge der ausgeübten Schläge die Endgeometrie des Bauteils.

Der Schlagabstand  $d_s$  ist der Abstand zwischen den Basismittelpunkten von zwei nacheinander ausgelösten Schlägen. Die volle Werkzeugfläche wird beim Stauchen nur zum Teil genutzt, worauf der Parameter *Werkzeugüberdeckung* hindeutet. Die *Schlagausrichtung* bezeichnet den Winkel  $\gamma_s$  des Stauchspalts gegenüber einem zum Blechrand senkrecht stehenden Stauchspalt.

Basierend auf der parametrisierten Umformzone wird im folgenden Abschnitt die Geometrieänderung von einem ebenen Blech durch eine Stauchoperation beschrieben.

### 6.1.1.3 Entstehung von dreidimensionalen Oberflächen

Bei einer kreisförmigen Kontur des umzuformenden Bleches wird sich ein Kegel nach einer Stauchoperation ausbilden (siehe Abbildung 6.4).

Zu dem Randpunkt  $\mathbf{p}_s$ , dem Mittelpunkt des Kreises  $\mathbf{p}_c$  sowie der Stauchung  $\delta$  hat der Radius der Blechkontur  $l_k$  die folgende Beziehung:

$$l_k^2 = \|\mathbf{p}_s - \mathbf{p}_c\|^2 + (\delta/2)^2. \quad (6.1)$$

Aufgrund der Abwickelbarkeit des Kegels wird der Radius des Kegelgrundkreises  $r_k$  und die Kegelhöhe  $h_k$  wie folgt berechnet:

$$2\pi r_k = \left[ 2\pi - 2 \arcsin \left( \frac{\delta}{2l_k} \right) \right] l_k \quad (6.2)$$

$$l_k^2 = h_k^2 + r_k^2 \quad (6.3)$$

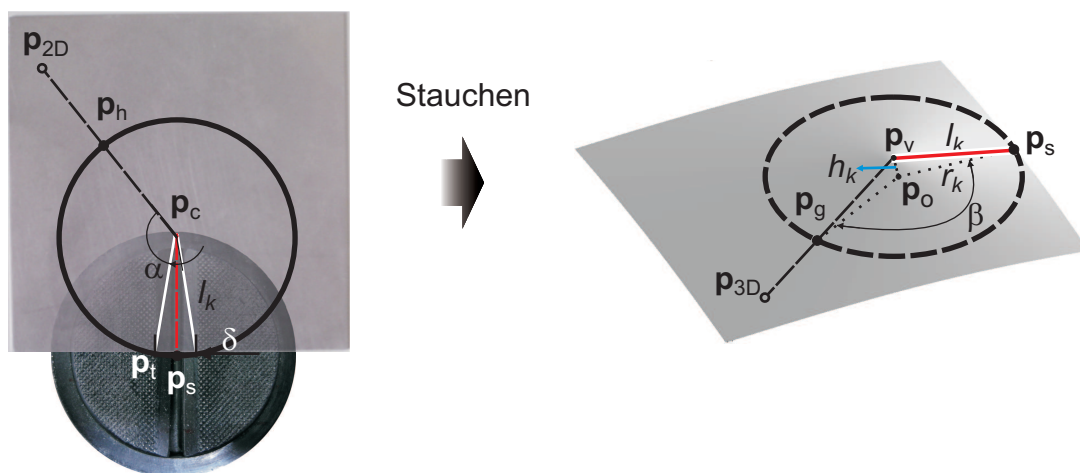


Abbildung 6.4: Erzeugung der Kegelfläche ausgehend vom ebenen Blech nach einer Umformoperation. Korrespondierende Punkte:  $\mathbf{p}_{2D}$  und  $\mathbf{p}_{3D}$ ,  $\mathbf{p}_h$  und  $\mathbf{p}_g$ .

Wie gezeigt, bildet sich auch bei einem nicht kreisförmigen Ausgangsblech eine kegelartige Oberfläche aus. Sei  $\mathbf{p}_{2D}$  ein Gitterpunkt auf dem Ausgangsblech und dementsprechend ein Punkt  $\mathbf{p}_{3D}$  auf der Kegelfläche, dann hat der Punkt  $\mathbf{p}_{3D}$  zu  $\mathbf{p}_v$  und  $\mathbf{p}_g$  die



folgende Beziehung:

$$\mathbf{p}_{3D} = \mathbf{p}_v + \rho_l(\mathbf{p}_g - \mathbf{p}_v), \quad (6.4)$$

wobei  $\rho_l$  das auf die Mantellänge  $\|\mathbf{p}_g\mathbf{p}_v\|$  bezogene Verhältnis ist.

Die Kegelspitze  $\mathbf{p}_v$  entspricht der Dreieckspitze  $\mathbf{p}_c$ . Dabei wird angenommen, dass außerhalb der lokalen Umformzone die Gitterabstände des Blechmaterials unverändert bleiben. Somit ist das Verhältnis  $\rho$  gleich dem in der Ebene:

$$\rho_l = \frac{\|\mathbf{p}_{2D} - \mathbf{p}_c\|}{l_k}. \quad (6.5)$$

Das Liniensegment  $\mathbf{p}_v\mathbf{p}_{3D}$  und der Kegelgrundkreis schneiden sich in dem Punkt  $\mathbf{p}_g$ , welcher den Punkt  $\mathbf{p}_h$  auf der Ebene abbildet. In der Tat haben die Kreisbögen  $\widehat{\mathbf{p}_s\mathbf{p}_g}$  und  $\widehat{\mathbf{p}_i\mathbf{p}_h}$  die gleiche Länge:

$$\alpha l_k = \beta r_k, \quad (6.6)$$

wobei  $\alpha$  und  $\beta$  die zwei Mittelpunktswinkel sind. Der Winkel  $\alpha$  wird auf der Ebene wie folgt berechnet:

$$\alpha = \arccos \frac{(\mathbf{p}_{2D} - \mathbf{p}_c) \cdot (\mathbf{p}_s - \mathbf{p}_c)}{\|\mathbf{p}_{2D} - \mathbf{p}_c\| \|\mathbf{p}_s - \mathbf{p}_c\|}. \quad (6.7)$$

Damit resultiert der Winkel  $\beta$  aus der Gleichung (6.6). Der Vektor  $\mathbf{p}_o\mathbf{p}_s$  fällt nach der Drehung um  $\beta$  im Uhrzeigersinn mit dem Vektor  $\mathbf{p}_o\mathbf{p}_g$  zusammen, was durch die folgende Beziehung beschrieben werden kann:

$$\mathbf{p}_g - \mathbf{p}_o = R_k \cdot (\mathbf{p}_s - \mathbf{p}_o), \quad (6.8)$$

$$R_k = \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta \\ -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix}. \quad (6.9)$$

Der Mittelpunkt des Kegelgrundkreises  $\mathbf{p}_o$  wird durch den Punkt  $\mathbf{p}_s$  und durch die Orientierung  $\mathbf{p}_s\mathbf{p}_c$  festgelegt. Damit gilt für den Mittelpunkt der folgende Zusammenhang:

$$\mathbf{p}_o = (x_o, y_o, 0) = \mathbf{p}_s + r_k \cdot \frac{\mathbf{p}_c - \mathbf{p}_s}{\|\mathbf{p}_c - \mathbf{p}_s\|}. \quad (6.10)$$

Der Punkt  $\mathbf{p}_o$  repräsentiert die projizierte Kegelspitze  $\mathbf{p}_v = (x_o, y_o, h_k)$ .

Aus den Gleichungen (6.4), (6.8) und (6.10) resultiert die punktuelle Formulierung der Bauteilgeometrie in Vektorschreibweise zu:

$$\begin{pmatrix} x_{3D} \\ y_{3D} \\ z_{3D} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_o \\ y_o \\ h_k \end{pmatrix} + \rho_l \begin{pmatrix} \cos \beta & \sin \beta & 0 \\ -\sin \beta & \cos \beta & 0 \\ 0 & 0 & -h_k \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_s - x_o \\ y_s - y_o \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (6.11)$$

oder in Form einer Gleichung

$$\left(1 - \frac{z_{3D}}{h_k}\right)^2 = \frac{1}{r_k^2} [(x_{3D} - x_o)^2 + (y_{3D} - y_o)^2]. \quad (6.12)$$

Zusammenfassend entsteht aus einer einzelnen Stauchoperation eine Kegelfläche des rechteckigen Ausgangsbleches (vergleiche Abbildung 6.2). Das Berechnungsmodell beschränkt sich dabei nicht auf umzuformende Bleche mit bestimmten Konturen und ist daher allgemeingültig.

#### 6.1.1.4 Geometrieänderung nach mehreren Stauchoperationen

Jede weitere Stauchoperation erzeugt eine kegelförmige Oberfläche. Diese Kegelflächen überlappen sich nacheinander zu einer gleich doppelgekrümmten Oberfläche:

$$z_{3D}^{Gesamt} = \sum^n (z_{3D})_n. \quad (6.13)$$

Bei der Berechnung müssen nach jeder Operation die Punkte  $\mathbf{p}_s$  und  $\mathbf{p}_c$  an die bereits gekrümmte Oberfläche angepasst werden (siehe Abbildung 6.5).

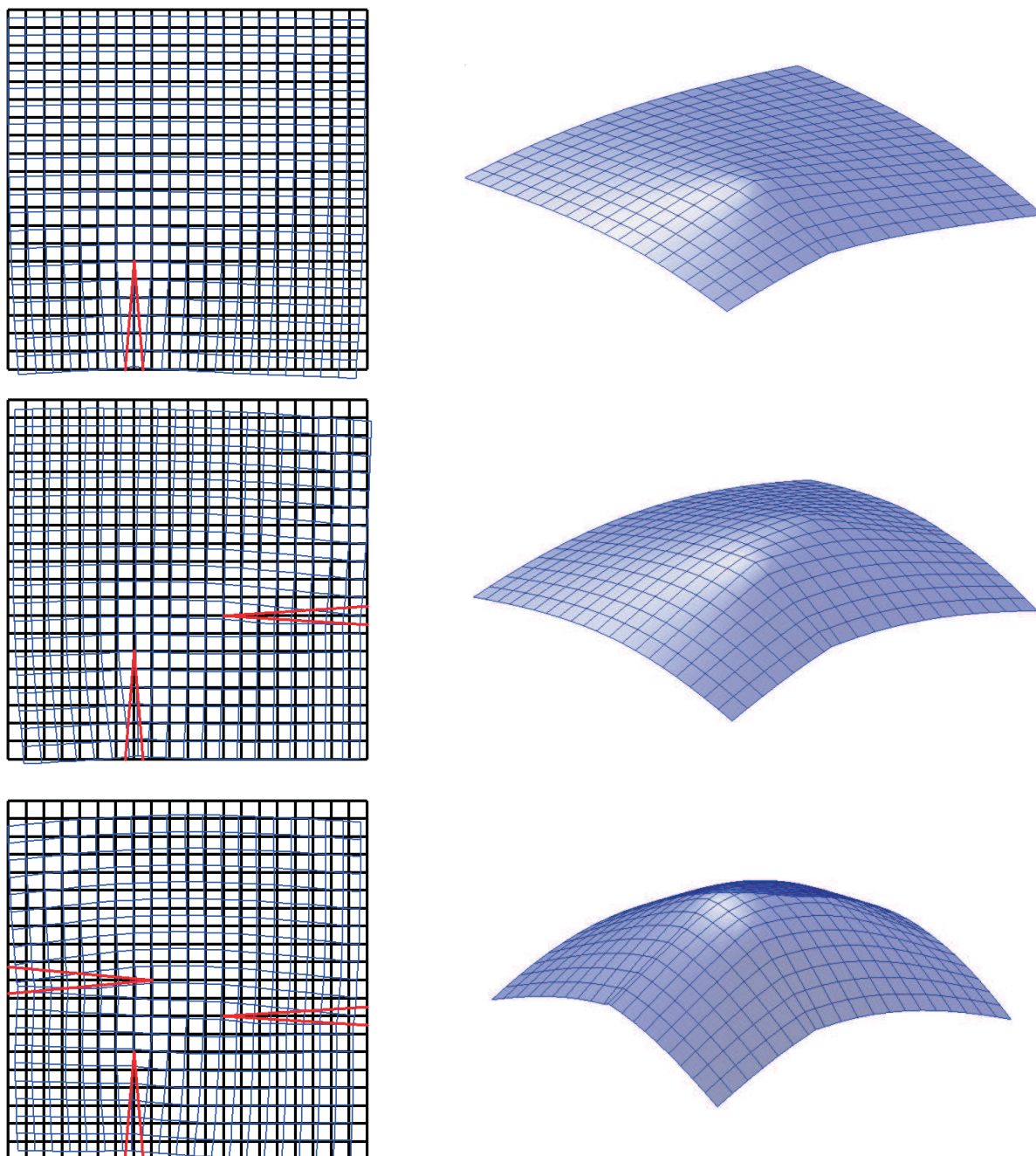


Abbildung 6.5: Modellberechnungen des Quadratbleches mit jeweils einem, zwei und drei Schlägen. Links: Das schwarze Gitter stellt das unverformte Blech dar, wobei die Umformzonen (roten Dreiecke) durch die Schlagpositionen und Stauchungen vordefiniert sind; das blaue Gitter zeigt die modellberechneten Ergebnisse in der X-Y-Ebene, welches der Gleichung (6.11) entsprechen. Rechts: Die dreidimensionalen Geometrien der jeweiligen verformten Bleche.

In diesem rein geometrischen Modell spielt die Reihenfolge der Stauchoperationen keine Rolle, denn die Wechselwirkung zwischen den nacheinander ausgelösten Einzeloperationen hängt von dem bereits verfestigten Material und dem veränderten Reibungszustand im Bereich der Umformzone ab und ist daher nicht geometrisch abbildbar. Im folgenden Abschnitt wird die Identifizierung von Modellkennlinien beschrieben.

#### 6.1.1.5 Modellkennlinien

Am Kraftformer ist das Auslösen eines Einzelschlags nicht kraftgesteuert, sondern weggesteuert. Die Presskraft hängt von der Stößelverstellung, der Blechdicke und dem Blechwerkstoff ab. Der Kraft-Stößelverstellung-Verlauf einer Blechprobe mit dem ausgewählten Werkstoff *DC04* und einer Dicke von einem Millimeter ist in Abbildung 2.5 (rechts) dargestellt. Aus der Abbildung kann ein gewisser Zusammenhang der Presskraft mit der Stößelverstellung entnommen werden. Somit bezeichnet das Stößelverstellung-Stauchungs-Diagramm die hierzu nötige Modellkennlinie. Die Kennlinien sind allerdings stark von dem verwendeten Stauchwerkzeug und den Prozessparametern Schlagabstand  $d_s$ , Werkzeugüberdeckung  $u_s$  und Schlagausrichtung  $\gamma_s$  abhängig (siehe Abbildung 6.3). Zudem weist das Stauchwerkzeug nach gewisser Einsatzdauer im Vorder- und Hinterteil unterschiedliche Verschleißzustände auf, was einen deutlichen Umformunterschied vor allem bei der Werkzeugüberdeckung  $u_s = 0,5 d_w$  zur Folge hat. Der Werkzeugverschleißzustand wird zwar nicht für das Modell parametrisiert, aber implizit durch die Kennlinien widergespiegelt.

Wie in FEM-Berechnung zur Beschreibung des Umformverhältnisses zwischen Kraft und Geometrie eine Materialkennlinie bzw. Spannungs-Dehnungskurve benötigt wird, muss zur Simulation des Stauchens der Zusammenhang zwischen Schlagstärke und Stauchung  $\delta$  durch Versuche mit vordefinierten Randbedingungen und variierten Prozessparametern identifiziert werden. Für die Arbeit folgt die Darstellung von Versuchsergebnissen der Identifizierung in Kapitel 6.2.2.

### 6.1.2 Modellbasierte Optimierung der Prozessparameter

Nach der Identifikation der Modellkennlinien liegt das gesamte Stauchmodell vor. Damit ist nun die Simulation des realen Stauchprozesses möglich. Das Modell wird dabei im Folgenden zur Berechnung einer Endgeometrie ausgehend von einem vorgegebenen Parametersatz herangezogen. Da in der Fertigung eine gewünschte Blechgeometrie vorgegeben ist, muss ein zielführender Parametersatz gefunden werden, um die gewünschte Geometrie zu erhalten. Dazu muss eine Rückwärtsrechnung des Modells durchgeführt werden. Die Bestimmung des Parametersatzes erfolgt durch Anwendung eines Optimierungsalgorithmus. Die Invertierung des Stauchmodells ist aufgrund der großen Anzahl der Eingangsparameter nicht sinnvoll. Daher scheint die folgende Vorgehensweise naheliegend („Tryout“): Zu Beginn werden eine Reihe von möglichen Parametersätzen festgelegt. Aus jedem Parametersatz ergibt sich eine Endgeometrie, die anschließend mit der gewünschten Geometrie verglichen wird. Kleine Geometrieabweichungen kennzeichnen einen zutreffenden Parametersatz. Damit könnte theoretisch aus allen möglichen Parametersätzen der beste ausgewählt werden. Dieses Vorgehen zur Bestimmung des besten Parametersatzes ist auf diese Weise allerdings nicht praktikabel, da die Anzahl aller möglichen Parametersätze unendlich groß ist. Stattdessen eignet sich zur Bestimmung des optimalen Parametersatzes ein heuristisches Optimierungsverfahren wie die *genetischen Algorithmen* (GA).

Abbildung 6.6 zeigt den Ablauf des modellbasierten Optimierungsvorgangs mittels des genetischen Algorithmus. Nach der Initialisierung geht eine Population (bzw. eine Menge von Parametersätzen) als Eingangsgröße in das Stauchmodell ein. Die daraus resultierenden Endgeometrien werden mit der gegebenen Bauteilgeometrie „best-fit“ verglichen und dann selektiert. Der Schritt Reproduktion einer neuen Population erfolgt durch die Rekombination, die Mutation und die direkte Vererbung von den ausgewählten Parametersätzen. Mit der damit gefundenen neuen Population beginnt eine neue Optimierungsschleife. Dieser Optimierungsvorgang wiederholt sich, bis ein vordefiniertes Kriterium erreicht wird. Die Funktionsweise des genetischen Algorithmus wird im folgenden Abschnitt näher erläutert.

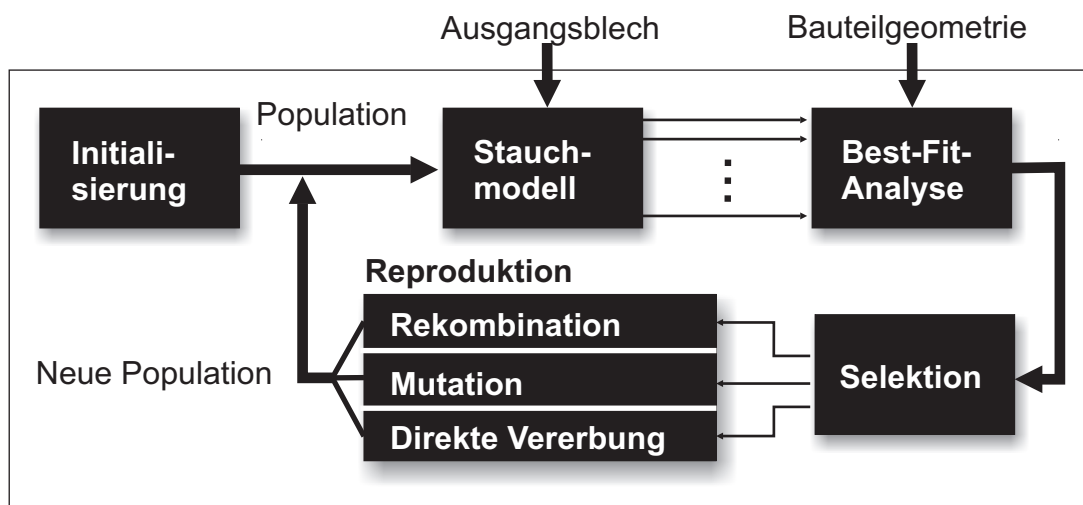


Abbildung 6.6: Modellbasierte Optimierung der Prozessparameter mittels des genetischen Algorithmus.

### 6.1.2.1 Beschreibung der genetischen Algorithmen

*Genetische Algorithmen* bilden den biologischen Evolutionsprozess ab und sind ein heuristisches Optimierungsverfahren [Poli2008]. Sie eignen sich dafür, das Optimum für ein komplexes Modell mit zahlreichen Eingangs- und Ausgangsparametern evolutionär zu finden. Ein genetischer Algorithmus beinhaltet die folgenden Laufschrte:

- *Initialisierung*: Eine Population wird erzeugt, welche eine Menge von Individuen enthält.
- *Evaluierung*: Jedes Individuum wird mittels einer definierten Zielfunktion (oder „Fitnessfunktion“) bewertet.
- *Selektion*: Die besten Individuen werden nach ihrer Evaluierung ausgewählt.
- *Rekombination* (engl.: „crossover“): Ein Teil der ausgewählten Individuen wird für die neue Generation miteinander gemischt.
- *Mutation*: Der andere Teil davon wird zufällig gekreuzt. Dabei werden Eigenschaften (Teile von Parametersätzen) zweier oder mehrerer Individuen nach dem Zufallsprinzip miteinander kombiniert.

- *Reproduktion*: In der neuen Generation können die Individuen nicht nur aus der Rekombination und Mutation, sondern auch direkt aus den selektierten Individuen kommen.
- *Abbruch*: Der Algorithmus wird beendet, wenn ein vordefiniertes Abbruchkriterium erreicht wird. Die Lösung stellt dabei das in der letzten Generation am besten bewertete Individuum dar.

Hierzu bezeichnet ein Individuum einen Parametersatz, welcher die sequenziellen Schläge mit zugehörigen Prozessparametern beinhaltet. Die Initialisierung der Population erfolgt durch zufällige Wertevorgaben der Prozessparameter (z. B. die Stauchung  $\delta$ ) der Individuen. Mithilfe der durch die Zielfunktion für gut befundenen Individuen kann eine neue Generation durch ihre Rekombination reproduziert werden. Zudem werden die Schlagfolgen von zwei oder mehreren Individuen untereinander ausgetauscht. In der neuen Generation kann ein neues Individuum auch durch die Mutation eines selektierten Individuums erzeugt werden. Dies gelingt durch eine zufällige Änderung der betroffenen Prozessparameter. Die so gebildete neue Generation dient als neue Eingangsgröße des genetischen Algorithmus. Der Evolutionsvorgang wiederholt sich, bis ein vorgegebenes Abbruchkriterium erfüllt wird.

### 6.1.2.2 Bereitstellung der Parametersätze

Wie bereits erläutert, bezeichnet ein Individuum einen Parametersatz, der aus den sequenziellen Schlägen mit zugehörigen Schlagparametern besteht. Ein Schlag wird hinsichtlich des geometrischen Stauchmodells wie folgt parametrisiert:

$$\mathbf{s} = (\mathbf{p}_s^T, \mathbf{p}_c^T, \delta, u_s, \kappa)^T. \quad (6.14)$$

Aus  $\mathbf{p}_s$  und  $\mathbf{p}_c$  wird die Schlagposition bestimmt (vergleiche Abbildung 6.4).  $\delta$  beschreibt die Stauchung und  $u_s$  die Werkzeugüberdeckung. Der eingeführte Zusatzparameter  $\kappa$  weist auf den am Werkzeug befindlichen Rand des umzuformenden Bleches für die bestimmten Schlagpositionen hin (siehe Abbildung 6.3). Die Schlagfolge

$$S = (\mathbf{s}_1, \mathbf{s}_2, \dots, \mathbf{s}_{n_s}) \quad (6.15)$$

( $n_s$ : Anzahl der Schläge) bildet einen Parametersatz bzw. ein Individuum ab. Somit ergibt sich eine Population zu

$$\mathcal{S} = \{S_i | i = 1, 2, \dots, n_i\}. \quad (6.16)$$

Bei der Initialisierung der Population werden die Punkte  $\mathbf{p}_s$  und  $\mathbf{p}_c$  gemäß den Identifikationsversuchen mit einem gegebenen Schlagabstand  $d_s$  festgelegt. Die Stauchung  $\delta$  hat bezüglich der Modellkennlinien nur eine begrenzte Anzahl der Werte zur Auswahl. Die initialisierte Stauchung wird in Kombination mit  $\kappa$  jeweils den Vorder- und Hinterteilen des Stauchwerkzeugs zugeordnet. Dies ist grundsätzlich nötig, weil bei der robotergreifenden Fertigung an einer bestimmten Schlagposition das Blech nur vom Vorder- oder Hinterteil des Werkzeuges gestaucht werden kann. Vor dem Ablauf des GA wird die Werkzeugüberdeckung  $u_s$  einmal zufällig aus dem zulässigen Wertebereich entnommen und während des Evolutionsvorgangs konstant gehalten. Da der umzuformende Bereich auf dem Ausgangsblech ohnehin beschränkt ist, weisen die verteilten Schläge eine endliche Anzahl auf. Der Schlagabstand  $d_s$  bestimmt die Anzahl der Schläge. Bei der Initialisierung müssen  $u_s$  und  $d_s$  für alle Individuen gleich gehalten werden und dürfen bis zum Abbruch der Rechenschleife nicht geändert werden. In der Tat variiert nur die Stauchung während des GA, die gemeinsam mit den Parametern  $(\mathbf{p}_s^T, \mathbf{p}_c^T, u_s, \kappa)^T$  als ein Individuum für die modellbasierte Generierung der Geometrie und die anschließende „Best-Fit“-Analyse zur Bewertung benötigt wird. Darüber hinaus wird die Anzahl der Individuen  $n_i$  empirisch vorgegeben.

### 6.1.2.3 Auswahl der Parametersätze

#### Fitnessfunktion

Die Fitnessfunktion dient zur Selektion besserer Individuen. Ein besseres Individuum bzw. ein besserer Parametersatz kann das Ausgangsblech näher zur Zielgeometrie bringen. Damit werden also geringere Abweichungen von der Zielgeometrie erreicht. Dies wird durch eine „Best-Fit“-Analyse der Geometrien bewertet. Daher kommt die „Best-Fit“-Funktion (siehe Gleichung (4.13)) in der Fitnessfunktion zum Einsatz, die ein Bewertungsmaß „Root Mean Square“ (RMS) liefert.



### Erzeugung der nächsten Generation

Zur Erzeugung der nächsten Generation der Population  $S^{k+1}$  müssen zunächst die Individuen (Parametersätze des Stauchmodells) in der aktuellen Population  $S^k$  nach dem Bewertungsmaß RMS sortiert werden. Die besten  $\rho_o$ -Prozent der sortierten Individuen gehen direkt in die nächste Generation  $S^{k+1}$  über. Da die Anzahl  $n_i$  der Individuen in der Population im Laufe des GA unverändert bleibt, wird die nächste Populationsgeneration  $S^{k+1}$  mit neu erzeugten Individuen aufgefüllt. Ein Anteil bzw.  $\rho_r$ -Prozent der neuen Population kommt aus der Rekombination der sortierten Individuen. Die restlichen  $\rho_m$ -Prozent werden durch mutierte Individuen in die Population  $S^{k+1}$  eingebracht. Es gilt

$$(\rho_o + \rho_r + \rho_m)\% = 1. \quad (6.17)$$

Die Werte für  $\rho_o$ ,  $\rho_r$  und  $\rho_m$  können, wie die Anzahl  $n_i$  der Populationsindividuen, nicht allgemeingültig ermittelt, sondern lediglich je nach Problemstellung empirisch vorgegeben werden.

### Abbruchkriterium

Die Selektion der sortierten Individuen und die Bildung der neuen Populationsgeneration werden abwechselnd wiederholt, bis das Rechenziel erreicht wird. Im idealen Fall kann ein Parametersatz gefunden werden, mit dem das Ausgangsblech exakt in die Zielgeometrie überführt wird. Wegen der Modellierungs-, Diskretisierungs-, Identifizierungs- und Rechenrundungsfehler sind jedoch gewisse Abweichungen zur Zielgeometrie durchaus zulässig. Für das Abbruchkriterium wird eine Schwelle für die Geometrieabweichungen bzw. der RMS („Root Mean Square“) verwendet werden. Es besteht aber die Gefahr, dass der Wert nicht unterschritten wird und der genetische Algorithmus das Kriterium nie erreicht. Aus diesem Grund wird der GA dann abgebrochen, wenn die neu gebildete Generation keinen evolutionären Schritt mehr liefern kann. Trotzdem ist hierbei eine relativ zeitaufwendige Rechnung zu erwarten. Das beste Individuum aus der neuesten Generation wird dann als der optimale Parametersatz angesehen.

### 6.1.3 Transformation der virtuellen Bauteilbewegungen in die reale Fertigungsumgebung

Im letzten Abschnitt wurde der optimale Parametersatz zur Erzielung der gewünschten Endgeometrie unter Anwendung eines genetischen Algorithmus gefunden. Die davon abgeleiteten Schlagpositionen und -stärken werden zunächst in einer virtuellen Roboter-Kraftformer-Arbeitsumgebung wiedergegeben, so dass die virtuelle Bahn des Greifers bzw. des Roboterarms errechnet werden kann. Die anschließende Transformation der virtuellen Roboterbahn in die reale Arbeitsumgebung erfolgt durch eine Kalibrierung der Greiferposition zwischen virtueller und realer Arbeitsumgebung.

#### 6.1.3.1 Berechnung virtueller Schlagpositionen

Die Fertigungszelle ist mit einem Kraftformer und einem KUKA-Roboter ausgestattet. Am Roboter wird der im Abschnitt 4.1.3 eingeführte Greifer verwendet. Abbildung 6.7 (links) zeigt die konfigurierte Fertigungszelle mit den Koordinatensystemen des Roboters, des Kraftformers und des Greifers..

Der Ursprung des Kraftformerkoordinatensystems (KKS) befindet sich im Mittelpunkt der Oberfläche des unteren Stauchwerkzeugs. Das Roboterkoordinatensystem (RKS) ist auf der Basis des ersten Arms festgelegt. Der TCP (engl.: „Tool Center Point“) des Roboters wird mithilfe der *Vier-Punkte*-Methode definiert und befindet sich am Ursprung des Greiferkoordinatensystems (GKS) (siehe Abbildung 4.4). Die beiden Maschinen müssen so zueinander positioniert sein, dass der Kraftformer im Konfigurationsraum des Roboters liegt [Kuka2005]. Somit kann der Roboter ohne Problem die Bauteile zur Bearbeitung ins Werkzeug führen.

Um eine simulative Fertigungszelle aufzubauen bzw. eine virtuelle Arbeitsumgebung abzubilden, werden der Kraftformer, der Roboter und der Greifer nach Hauptgeometriemerkmalen digitalisiert. In Abbildung 6.7 (rechts unten) sind die Werkzeuge (zwei übereinander stehende Kreise), der Greifer (Kontur mit verbundenen Liniensegmenten) und das eingeklemmte Blech (auf der Greiferkontur festgebundene Fläche) mit den wichti-

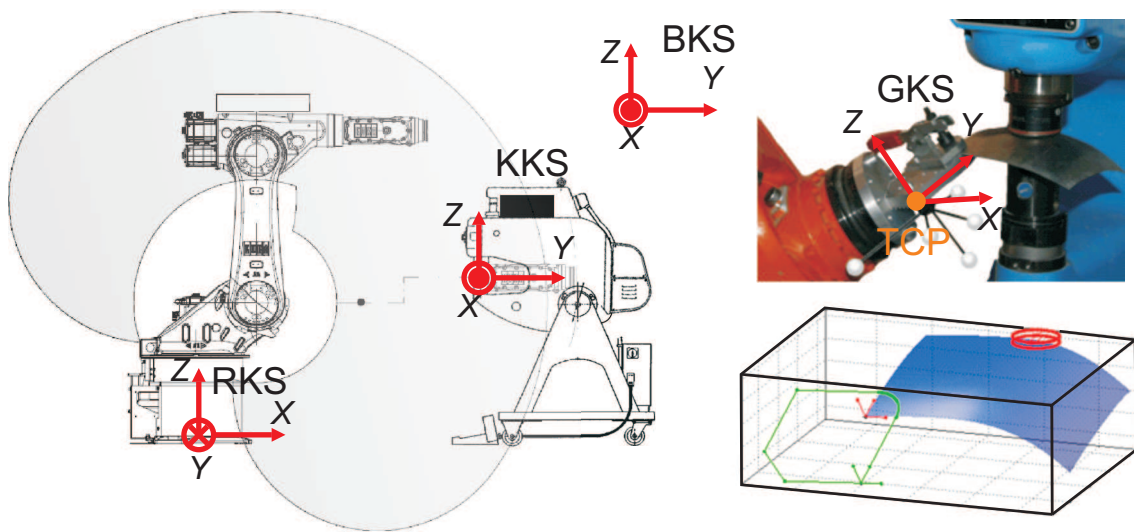


Abbildung 6.7: Links: Roboterkonfigurationsraum ([Kuka2005]) und der darin liegende Kraftformer. Rechts: Im Vergleich zur realen Arbeitsumgebung werden nur die Stauchwerkzeuge (zwei übereinander liegende Kreise), der Greifer (geschlossene Kontur mit verbundenen Liniensegmenten) und das Bauteil (auf der Greiferkontur festgebundene Fläche) virtuell dargestellt. (KS: Koordinatensystem; BKS: Basis-KS; KKS: Kraftformer-KS; RKS: Roboter-KS; GKS: Greifer-KS; TCP: „Tool Center Point“.)

gen Baumaßen und Koordinatensystemen digital dargestellt.

Die Schläge aus dem ermittelten Parametersatz werden am Kraftformer synchron zum Roboter in einer definierten Reihenfolge durchgeführt. Da ein Parametersatz keine Information über die Schlagreihenfolge enthält, müssen die Schläge nach der Konfiguration der Fertigungszelle angeordnet werden. Für die Anordnung ist eine glatte Schlagpositionsverschiebung erforderlich, d. h., es darf keine ruckartige Bauteilbewegung auftreten. Die Schläge werden mithilfe des Parameters  $\kappa$  (siehe Gleichung 6.14) den Rändern im Uhrzeigersinn oder umgekehrt zugeordnet. Die Reihenfolge wird hierbei mit Rand 1  $\rightarrow$  Rand 2  $\rightarrow$  Rand 3  $\rightarrow$  Rand 4 festgelegt.

In der simulativen Umgebung wird das Kraftformerkoordinatensystem (KKS) parallel zum globalen Koordinatensystem ausgerichtet. Dessen Ursprung befindet sich im Zen-

trum der Oberfläche des unteren Stauchwerkzeugs und wird mit (0,0,0) definiert. Das virtuelle Bauteil muss zum Werkzeug verschoben werden, so dass die aktuelle Schlagposition aus dem Parametersatz mit dem Ursprung (0,0,0) zusammenfällt. Weiterhin muss die Tangentenfläche des Bauteils an der aktuellen Schlagposition parallel zur Werkzeugoberfläche sein. Zudem wird das lokale Bauteilkoordinatensystem  $(X_S, Y_S, Z_S)$  um den Ursprung (0,0,0) mit der Rotationsmatrix  $R_{KS}$  gedreht, bis es parallel zum KKS ist:

$$R_{KS} = E_K \cdot E_S^{-1}, \quad (6.18)$$

wobei  $E_S$  und  $E_K$  die Achsenmatrizen der entsprechenden Koordinatensysteme sind. Auf diese Weise erfolgt die Positionierung des Bauteils vor jeder Schlagoperation. Aus jeder Bauteilposition werden die Greiferposition  $\mathbf{p}_{TCP}$  und -orientierung  $E_{TCP}$  über die Geometrie Verbindung zwischen Bauteil und Greifer ermittelt (siehe Abbildung 6.7). Eine Folge von  $(\mathbf{p}_{TCP}^{virtuell}, E_{TCP}^{virtuell})$  beschreibt die virtuelle Roboterbahn.

### 6.1.3.2 Kalibrierung der Greiferposition

Im letzten Abschnitt wurde die Methode zur Ermittlung der virtuellen Roboterbahndaten  $(\mathbf{p}_{TCP}^{virtuell}, E_{TCP}^{virtuell})$  durch den simulativen Ablauf des inkrementellen Stauchens mit dem optimalen Parametersatz vorgestellt. Zur Generierung der realen Bahndaten bzw. der Schlagpositionen für die Robotersteuerung muss beachtet werden, dass die Verschiebungen und die Drehungen in der realen und virtuellen Arbeitsumgebung gleich gehalten werden, d. h.,

$$\Delta \mathbf{p}_{TCP}^{real} \stackrel{!}{=} \Delta \mathbf{p}_{TCP}^{virtuell}, \quad (6.19)$$

$$R_{TCP}^{real} \stackrel{!}{=} R_{TCP}^{virtuell}. \quad (6.20)$$

Zur Verknüpfung der realen und virtuellen Umgebung wird eine physikalische Referenzposition definiert, mit dessen Hilfe die realen und virtuellen Bahndaten zueinander transformiert werden können.

Abbildung 6.8 zeigt eine mögliche *Referenzposition*, bei der die Position ( $\mathbf{p}_{TCP0}^{real}$ ,  $E_{TCP0}^{real}$ ) durch manuelles Anfahren des Roboters vorgegeben wird:

$$\mathbf{p}_{TCP0}^{real} = \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}, \quad (6.21)$$

$$E_{TCP0}^{real} = R_z(A_0) \cdot R_y(B_0) \cdot R_x(C_0) \cdot E_R. \quad (6.22)$$

Die Berechnung der Rotationsmatrizen  $R_z$ ,  $R_y$ ,  $R_x$  ist Abschnitt 4.1.2 zu entnehmen.  $E_R$  ist die Achsenmatrix des Roboters in der Referenzposition. In der virtuellen Umgebung hingegen werden der TCP  $\mathbf{p}_{TCP0}^{virtuell}$  und die Achsenmatrix  $E_{TCP0}^{virtuell}$  wie folgt definiert:

$$\mathbf{p}_{TCP0}^{virtuell} = \begin{pmatrix} L \\ W \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -W_G \\ L_G \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (6.23)$$

$$E_{TCP0}^{virtuell} = E_R = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (6.24)$$

wobei  $L/W$  die Länge/Breite des Bleches und  $L_G/W_G$  die Maße des Greifers sind.

Da das Roboterkoordinatensystem (RKS) nicht parallel zum Kraftformerkoordinatensystem (KKS) definiert wurde, müssen die Gleichungen (6.19) und (6.20) angepasst werden:

$$\Delta \mathbf{p}_{TCP}^{real} \stackrel{!}{=} R_{RK} \cdot \Delta \mathbf{p}_{TCP}^{virtuell}, \quad (6.25)$$

$$R_{TCP}^{real} \stackrel{!}{=} R_z(A) \cdot R_y^T(B) \cdot R_x^T(C), \quad (6.26)$$

mit

$$R_{TCP}^{virtuell} = R_z(A) \cdot R_y(B) \cdot R_x(C), \quad (6.27)$$

$$R_{RK} = E_R \cdot E_K^{-1}. \quad (6.28)$$

Daraus ergeben sich dann der reale TCP und die reale Achsenmatrix zu

$$\mathbf{p}_{TCP}^{real} = \mathbf{p}_{TCP0}^{real} + R_{RK} \cdot (\mathbf{p}_{TCP}^{virtuell} - \mathbf{p}_{TCP0}^{virtuell}), \quad (6.29)$$

$$E_{TCP}^{real} = R_{TCP}^{real} \cdot E_{TCP0}^{real} = R_{TCP}^{real} \cdot R_z(A_0) R_y(B_0) R_x(C_0) \cdot E_R, \quad (6.30)$$

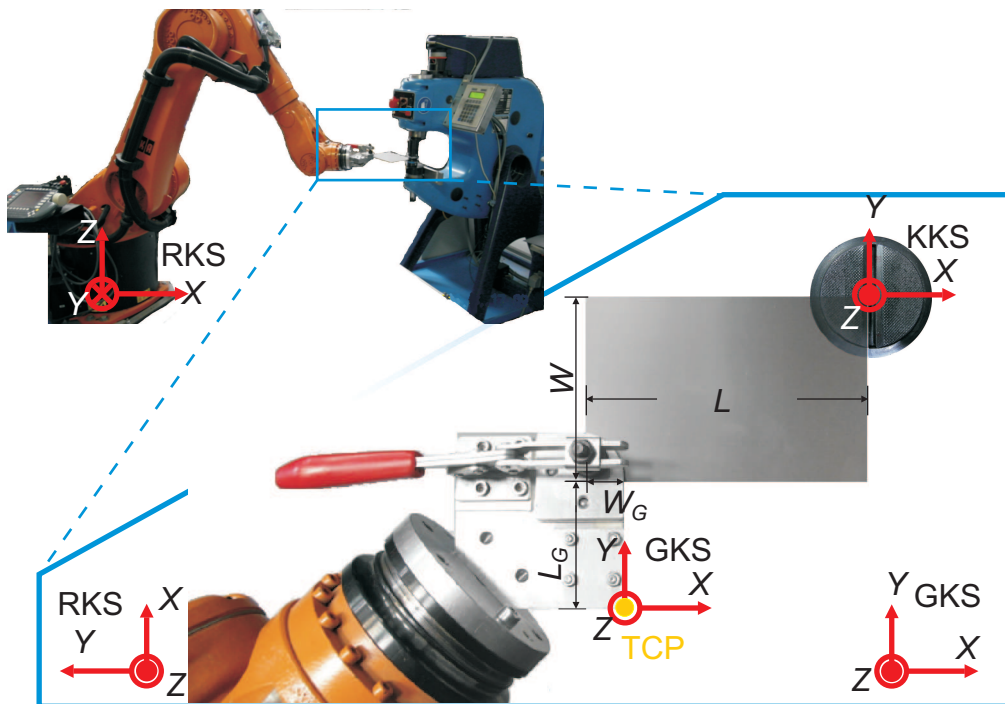


Abbildung 6.8: Definition der Referenzposition zum Koordinatenabgleich zwischen der realen und virtuellen Umgebung. Der Roboterarm wird manuell zu dieser Position gefahren, so dass eine Ecke des Bleches im Mittelpunkt der Werkzeugoberfläche liegt. Dabei werden die Roboterkoordinaten als  $(X_0, Y_0, Z_0, A_0, B_0, C_0)$  bezeichnet. (KS: Koordinatensystem; KKS: Kraftformer-KS; RKS: Roboter-KS; GKS: Greifer-KS; TCP: „Tool Center Point“; L, W: Länge, Breite des Bleches;  $L_G, W_G$ : Maße des Greifers)

mit

$$R_{TCP}^{virtuell} = E_{TCP}^{virtuell} \cdot (E_{TCP0}^{virtuell})^{-1}. \quad (6.31)$$

Damit liefert bei jeder Schlagposition der Verschiebungsvektor  $\mathbf{p}_{TCP}^{real}$  die drei Verschiebungen  $(X, Y, Z)_{real}$  und die Rotationsmatrix  $E_{TCP}^{real}$  die drei Drehwinkel  $(A, B, C)_{real}$  für die Robotersteuerung.

#### 6.1.4 Generierung der Steuerungsdaten zur automatisierten Fertigung

Nach der Transformation der virtuellen Roboterbahn in die reale Arbeitsumgebung kann die Schlagstärke  $h_s$  zu der entsprechenden Schlagposition hinzugefügt werden. Damit liegen alle Daten vor und jede Befehlszeile der Steuerungsdaten besteht aus insgesamt sieben Komponenten ( $X, Y, Z; A, B, C; h_s$ ).

Bei der Ausführung der Steuerungsdaten bewegt sich der Roboter von der aktuellen zur nächsten Schlagposition. Währenddessen verschieben sich der Greifer bzw. das Blech relativ zu den Stauchwerkzeugen. Die dadurch unvermeidbare Oberflächenberührung führt zu einer Gegenbewegung des Bauteils. Es besteht daher die Gefahr, dass das Blech innerhalb des Greifers verschoben oder sogar aus dem Greifer herausgezogen wird. Dies tritt vor allem bei stark gekrümmten Blechen auf, weil der Roboter die Krümmung des Bleches nicht berücksichtigen und damit nicht um die Werkzeuge herumfahren kann. Das Problem entsteht, da der Roboter nur lineare Bewegungen zwischen zwei Schlagpositionen ausführt. Um diese Gegenbewegung verringern zu können, werden die Roboterbahndaten interpoliert. Zur Interpolation werden nicht nur der Abstand  $\sqrt{\Delta X^2 + \Delta Y^2 + \Delta Z^2}$  zwischen je zwei Schlagpositionen, sondern auch die Winkeldifferenzen ( $\Delta A, \Delta B, \Delta C$ ) herangezogen. Bevorzugt wird eine „spline“ Interpolation in der Translation und eine kreisförmige Interpolation um das Zentrum der Werkzeugoberfläche in der Rotation [Farin1996]. Die Interpolationsmethoden sind in Abbildung 6.9 verdeutlicht.

Die Schlagstärken werden an jedem interpolierten Stützpunkt auf null gesetzt. Es muss dann überprüft werden, ob alle Stützpunkte bzw. Schlagpositionen überhaupt vom Roboter erreicht werden können. Eine Überprüfung erfolgt in der realen Arbeitsumgebung. Liegen nicht erreichbare Stützpunkte vor, müssen sie von den erreichbaren Nachbarpunkten (z. B. im Umkreis von 50 mm) ersetzt werden. Zur Verhinderung nicht erreichbarer Schlagpositionen dürfen derartige Positionen bereits bei der Initialisierung der Population nicht zugelassen werden.

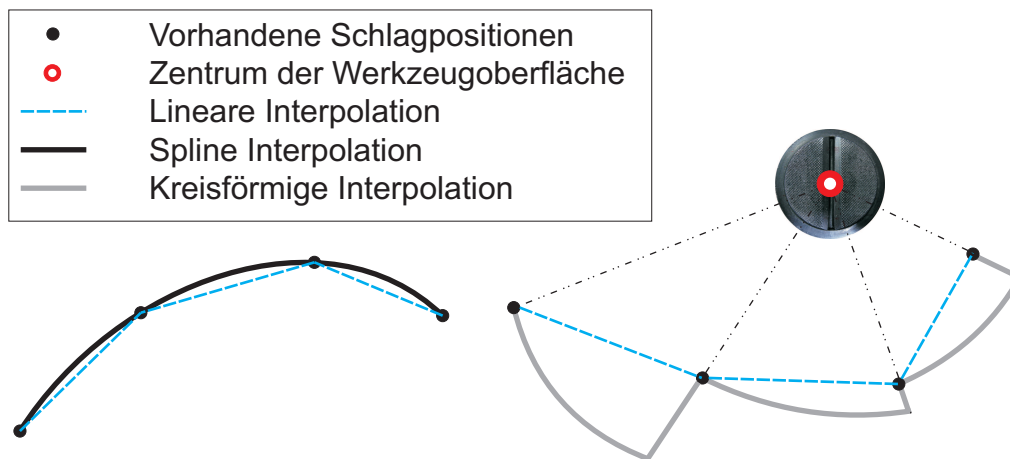


Abbildung 6.9: Links: Spline Interpolation im Vergleich zur linearen Interpolation (gestrichelte Linien). Rechts: Kreisförmige Interpolation um das Zentrum der Werkzeugoberfläche im Vergleich zur linearen Interpolation (gestrichelte Linien.)

## 6.2 Analyse des modellbasierten Verfahrens

Für das modellbasierte Verfahren stehen das geometrische Stauchmodell und die dazugehörigen Modellkennlinien im Schwerpunkt der Untersuchung. Die Fertigungsgenauigkeit wird als ein wichtiger Faktor zur Evaluierung des Verfahrens dargelegt.

### 6.2.1 Verifikation des erstellten Stauchmodells

#### 6.2.1.1 Versuchsdefinition und -durchführung

In diesem Abschnitt wird das geometrische Stauchmodell auf die drei Modellierungsschritte verifiziert. Die Verifikation erfolgt durch ein Geometriematching zwischen Modell und Versuch. Da der Eingangsparameter des Modells  $\delta$  (Stauchung) im Versuch nicht unmittelbar messbar ist, wird eine vom Versuch ermittelnde Blechgeometrie mit mehreren modellberechneten Geometrien verglichen. Letztendlich wird zur Verifikation die Geometrie mit kleinsten Geometrieabweichungen herangezogen.

Die geometrische Modellierung des Stauchens erfolgte zuerst durch eine mathematische Beschreibung der Blechgeometrieänderung beim Einzelschlag. Für zwei nachein-



ander ausgelöste Schläge überlappen sich die jeweils erreichten Geometrien. Bei mehreren Schlägen bleibt die Endgeometrie auch bei unterschiedlicher Reihenfolge gleich. Zur Verifizierung dieser drei Modellierungsschritte werden im Folgenden die entsprechenden Versuche definiert.

Für den ersten Schritt werden zwei quadratische Bleche mit dem Maß  $88 \text{ mm} \times 88 \text{ mm}$  durch einen Einzelschlag mit einer beliebigen Schlagstärke in der jeweiligen Schlagausrichtung verformt, um zu überprüfen, ob tatsächlich eine kegelförmige Oberfläche des Bleches erzeugt wird. Im zweiten Schritt werden zur Überprüfung der linearen Überlappung der Einzelgeometrien zwei Schläge mit gleicher Stauchstärke auf einem Blech mit dem Maß  $88 \times 176 \text{ mm}^2$  nacheinander ausgelöst. Zuletzt wird überprüft, ob sich zwei gleiche Bleche mit identisch definierten Schlägen der entgegengesetzten Ausführungsreihenfolge identisch verformen (siehe Abbildung 6.10).

Alle verformten Bleche werden mittels GOM ATOS-Messsystem optisch vermessen (siehe Kapitel 4.2.2). Sodann erfolgt ein Vergleich zwischen den digitalisierten und modellgenerierten Geometrien durch die „Best-Fit“-Analyse. Als Bewertungsmaß für diesen Geometrievergleich wird der RMS (engl.: „Root Mean Square“) definiert. Dieses beschreibt die Geometrieabweichungen über die gesamte Blechoberfläche als Durchschnittswert.

Die verwendeten Bleche sind aus dem Werkstoff *DC04* ( $E = 210 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0,3$ ,  $\rho = 7,94 \text{ g/cm}^3$ ) und haben die gleiche Dicke von  $1,0 \text{ mm}$ .

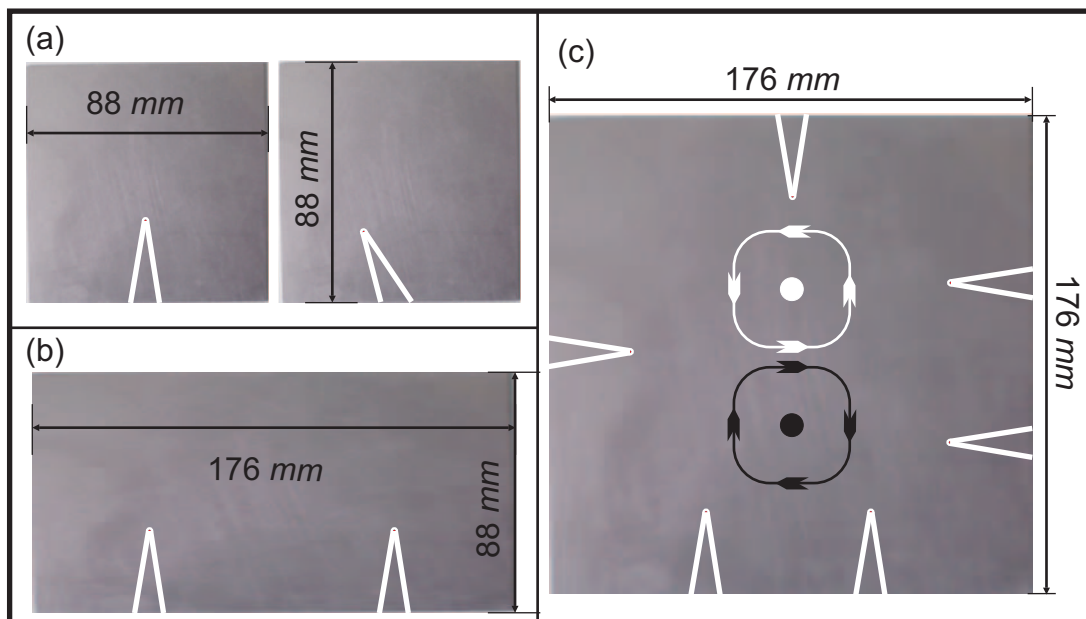


Abbildung 6.10: Versuchsbleche mit den vordefinierten Schlägen zur Verifizierung des geometrischen Stauchmodells. Kategorie (a): zwei gleiche Quadratbleche ( $88 \text{ mm} \times 88 \text{ mm}$ ) mit den unterschiedlichen Schlagausrichtungen  $0^\circ$  und  $40^\circ$ ; Kategorie (b): zwei gleiche Schläge auf dem Rechteckblech ( $88 \text{ mm} \times 176 \text{ mm}$ ); Kategorie (c): zwei gleiche Quadratbleche ( $176 \text{ mm} \times 176 \text{ mm}$ ) mit den gleichen Schlägen, aber den umgekehrten Schlagreihenfolgen (schwarze und weiße Pfeile im Kreislauf).

### 6.2.1.2 Versuchs- und Berechnungsergebnisse

Zu dem Versuch für die Blechgeometrieänderung beim Einzelschlag zeigt Abbildung 6.11 die aus der „Best-Fit“-Analyse resultierenden Geometrieabweichungen. Das Bewertungsmaß RMS beträgt nur  $0,16 \text{ mm}$  auf der  $88 \times 88 \text{ mm}^2$  Fläche. Es ist zu erkennen, dass um die Umformzone herum die größten Abweichungen auftreten, wobei das Material nicht ideal zusammengestaucht, sondern zu Falten gepresst wurde. Falten auf einem gefertigten Bauteil sind jedoch aufgrund der Anforderung an die Bauteiloberflächenqualität zu vermeiden. Im Versuch wurde eine relativ große Umformung bei einem Einzelschlag gewählt, um mit wenigen Schlägen eine vom GOM ATOS-Messsystem erkennbare Blechgeometrie zu erzeugen. Diese in der Versuchsreihe gebildeten Falten sind durch das geometrische Modell nicht zu erwarten. Zudem treten gewisse Abwei-

chungen um die abgerundete Kegelspitze herum auf, die im Modell durch einen Punkt abgebildet wird.

Abbildung 6.12 zeigt das Ergebnis eines zweiten Versuchs, bei dem die Umformoperation des Stauchwerkzeugs eine Schlagausrichtung von  $40^\circ$  aufweist. Daher steht die Falte nicht senkrecht zum Rand. Es ergibt sich trotzdem ein relativ kleines RMS von  $0,17 \text{ mm}$ . In beiden Versuchen treten die größten Abweichungen um die Falte herum und an der abgerundeten Kegelspitze auf. Die Ergebnisse der zwei Verifikationsversuche zeigen, dass nach einem Einzelschlag des Stauchens ein ebenes Blech tatsächlich in eine kegelförmige Form überführt werden kann.

Die Abweichungen zwischen Versuch und Modell bei der linearen Überlappung von kegelförmigen Einzelgeometrien sind in Abbildung 6.13 dargestellt. Der RMS ist nach der „Best-Fit“-Analyse  $0,20 \text{ mm}$  (auf der  $88 \times 176 \text{ mm}^2$  Fläche). Die größten Abweichungen befinden sich nach wie vor am Rand der Umformzonen. Im Vergleich zu den Abbildungen 6.11 und 6.12 pflanzen sich die Abweichungen von den zwei abgerundeten Kegelspitzen zur Mitte hin fort.

Zusammenfassend deuten die kleinen RMS-Werte bzw. die geringen Geometrieabweichungen darauf hin, dass einerseits das geometrische Stauchmodell die realen Bauteilgeometrien abbilden kann und andererseits eine hohe Fertigungsgenauigkeit über das Modell erzielt werden kann.

Abbildung 6.14 zeigt die Verformungsergebnisse der Schläge in gegenläufigen Reihenfolgen auf den zwei Quadratblechen. Im Modell hat die größte Abweichung eine Größenordnung von  $10^{-4} \text{ mm}$ , die aber als Rundungsfehler angesehen werden kann. Im Versuch treten die großen Abweichungen dort auf, wo die zwei nacheinander ausgelösten Schläge nahe beieinanderliegen (vergleiche Abbildung 6.10). Die Versuche zeigen, dass das Modell bei mehreren Schlägen zwar nicht exakt die Realität abbildet, die Abweichungen sich aber trotzdem in einem vertretbaren Rahmen (siehe Histogramm der Abbildung 6.14 links) bewegen.

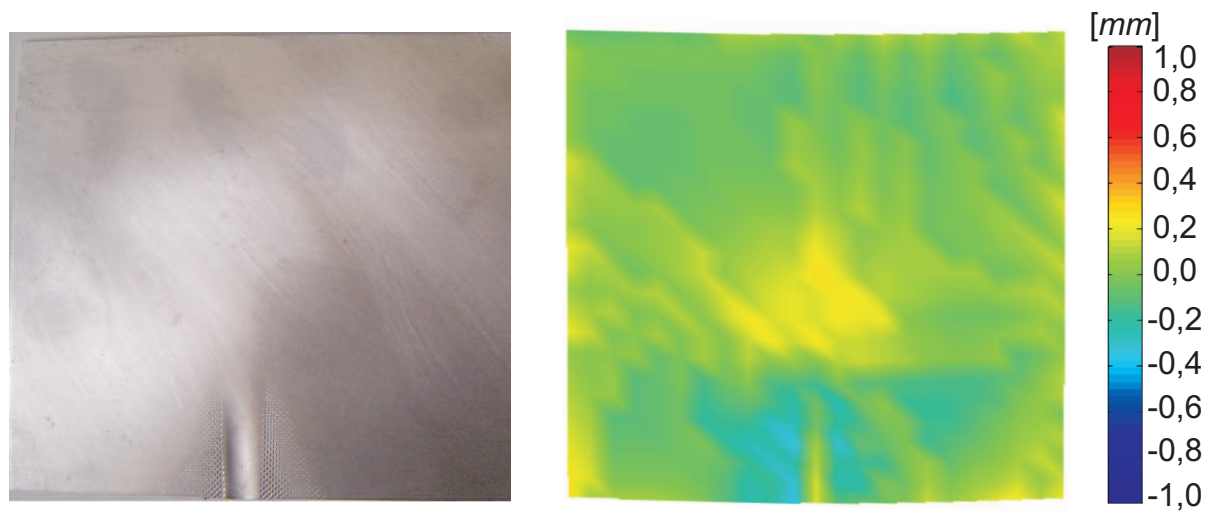


Abbildung 6.11: Versuch: Ein Einzelschlag ist auf dem Quadratblech ( $88 \times 88 \text{ mm}^2$ ) mit der Schlagausrichtung  $\gamma_s = 0^\circ$  ausgelöst worden. Links: das umgeformte Blech. Rechts: die Geometrieabweichungen zwischen Modell und Versuch.

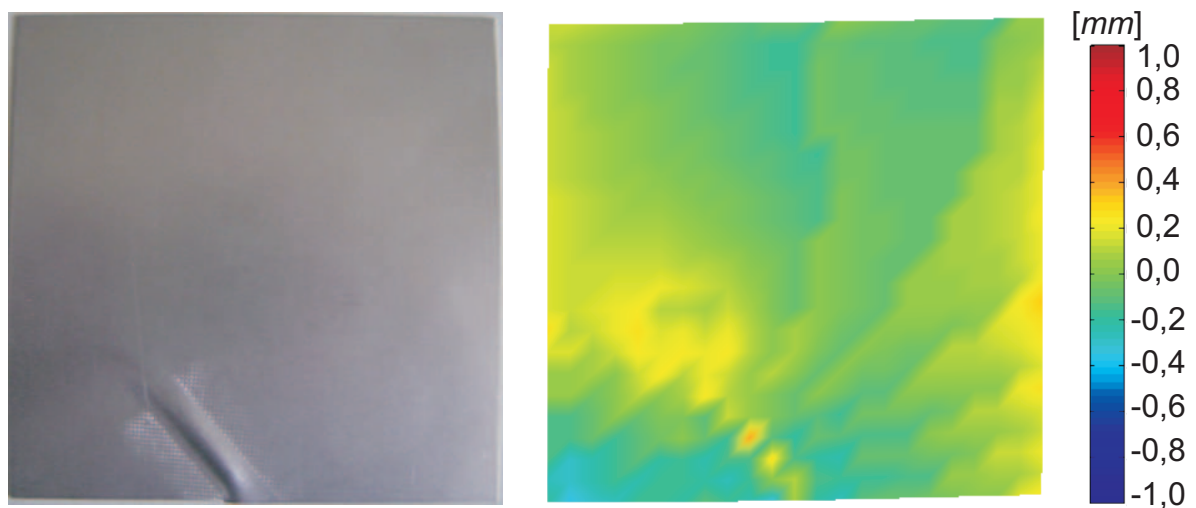


Abbildung 6.12: Versuch: Ein Einzelschlag ist auf dem Quadratblech ( $88 \times 88 \text{ mm}^2$ ) mit der Schlagausrichtung  $\gamma_s = 40^\circ$  ausgelöst worden. Links: das umgeformte Blech. Rechts: die Geometrieabweichungen zwischen Modell und Versuch.

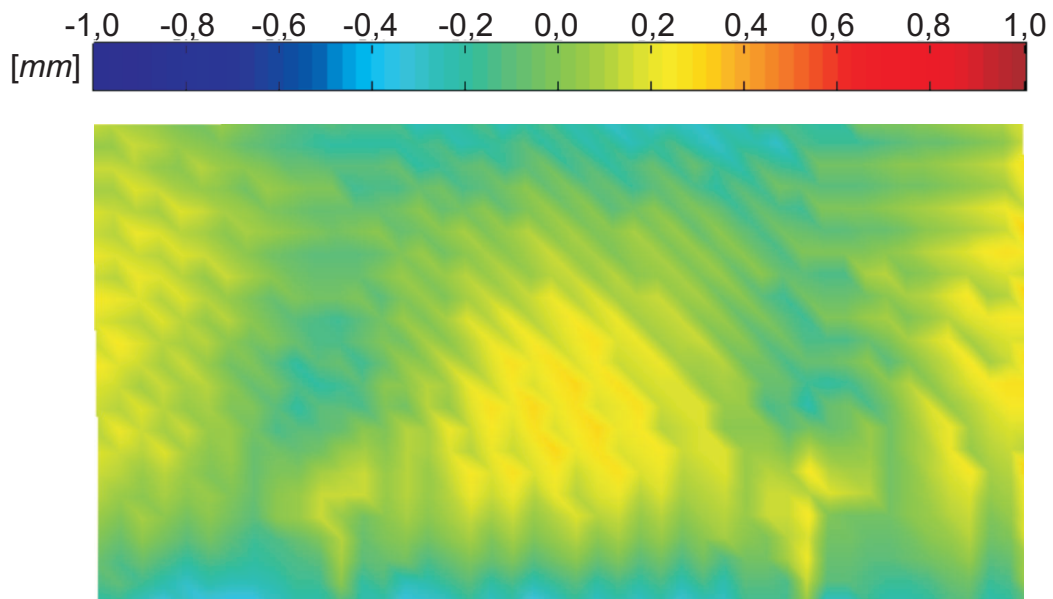


Abbildung 6.13: Versuch: Zwei Schläge wurden auf dem Rechteckblech ( $88 \times 176 \text{ mm}^2$ ) ausgelöst: Geometrieabweichungen zwischen Modell und Versuch.

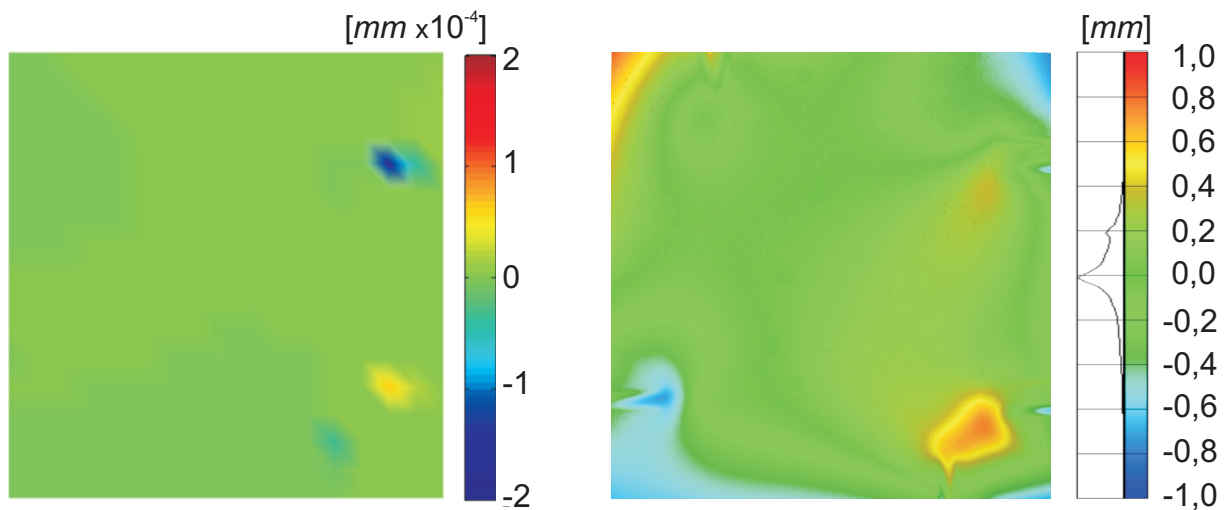


Abbildung 6.14: Versuch: Schläge sind in gegenläufigen Reihenfolgen auf den zwei gleichen Quadratblechen ( $176 \times 176 \text{ mm}^2$ ) ausgelöst worden. Links: die Geometrieabweichungen zwischen den vom Modell generierten Geometrien. Rechts: die Geometrieabweichungen zwischen den umgeformten Blechen.

## 6.2.2 Identifikation der Modellkennlinien

### 6.2.2.1 Versuchsdefinition und -durchführung

Nachdem das geometrische Stauchmodell verifiziert wurde, ist es nötig, die mit dem mechanischen Teil verknüpften Parameter zu identifizieren. Der Eingangsparameter des geometrischen Stauchmodells ist die Stauchung  $\delta$ , die bei realer Umformung von der Stauchstärke bzw. Stößelverstellung bestimmt wird. Die Beziehungen zwischen der Stauchung und der Stößelverstellung werden somit durch sogenannte Modellkennlinien beschrieben. Im Folgenden wird untersucht, wie sie von den unterschiedlichen Prozessparametern (Schlagabstand  $d_s$ , Werkzeugüberdeckung  $u_s$  und Schlagausrichtung  $\gamma_s$ ) abhängen, um eine standardisierte Modellkennlinie für das Stauchmodell zu generieren.

Der Schlagabstand  $d_s$  bezeichnet den Abstand zwischen zwei nacheinander ausgelösten Schlägen. Er hat einen Wertebereich von null bis zum Werkzeugdurchmesser  $d_w$ . Der Bereich wird hierbei in vier Größen (0,25; 0,5; 0,75; 1,0)  $d_w$  diskretisiert. Die Werkzeugoberfläche wird beim Stauchen nur zum Teil genutzt, diese Tatsache wird durch den Parameter Werkzeugüberdeckung beschrieben. Die drei möglichen Größen (0,5; 0,7; 0,9)  $d_w$  werden für die Werkzeugüberdeckung  $u_s$  gewählt. Die Schlagausrichtung  $\gamma_s$  wird ebenfalls in drei Größen unterteilt: (0°; 20°; 40°). Zur Versuchsplanung werden die drei Parameter miteinander kombiniert. Die Schlagausrichtung  $\gamma_s = 40^\circ$  wird nur mit der Werkzeugüberdeckung  $u_s = 0,7 d_w$  zusammengelegt, da mit einem derart schräg stehenden Stauchspalt ein Versuchsblech nach mehreren Schlägen keine vom GOM ATOS-Messsystem erkennbare Geometrie aufweist. Somit ergeben sich insgesamt  $4 \times 3 \times 2 + 4 = 28$  Versuche.

Es sei anzumerken, dass aufgrund der Zugänglichkeit das Stauchwerkzeug im Vorder- teil mehr als im Hinterteil verschlissen wurde. Das macht einen deutlichen Umformungs- unterschied bei der Werkzeugüberdeckung  $u_s = 0,5 d_w$  aus. Da die bereits geplanten Versuche mit dem Vorderteil des Werkzeugs durchgeführt werden sollen, werden acht Zusatzversuche mit gleicher Werkzeugüberdeckung  $u_s = 0,5 d_w$  bei Verwendung

des Hinterteils des Werkzeugs hinzugefügt. Es steigt die Gesamtzahl der Versuche auf 36. Als Versuchsergebnis wird der Zusammenhang zwischen der Stauchung  $\delta$  und der Schlagstärke untersucht. Bei dem eingesetzten Krafftormer wird hierbei die Zustellung auf  $22 \text{ mm}$  festgelegt und die Stößelverstellung  $h_s$  mit  $1,2 \text{ mm}$ ,  $1,4 \text{ mm}$  und  $1,6 \text{ mm}$  variiert. Zu jedem Versuch werden daher drei Bleche jeweils mit den drei Stößelverstellungen durch den Krafftormer bearbeitet. Auf jedem Blech werden die Schläge von Rand 1 bis Rand 4 an den aufgezeichneten Schlagpositionen ausgelöst (siehe Abbildung 6.15). Jeder Schlag hat die gleiche Stärke. Somit wird pro Blech eine einzige Stauchung identifiziert, die schließlich zusammen mit der Stößelverstellung die Modellkennlinie bildet.

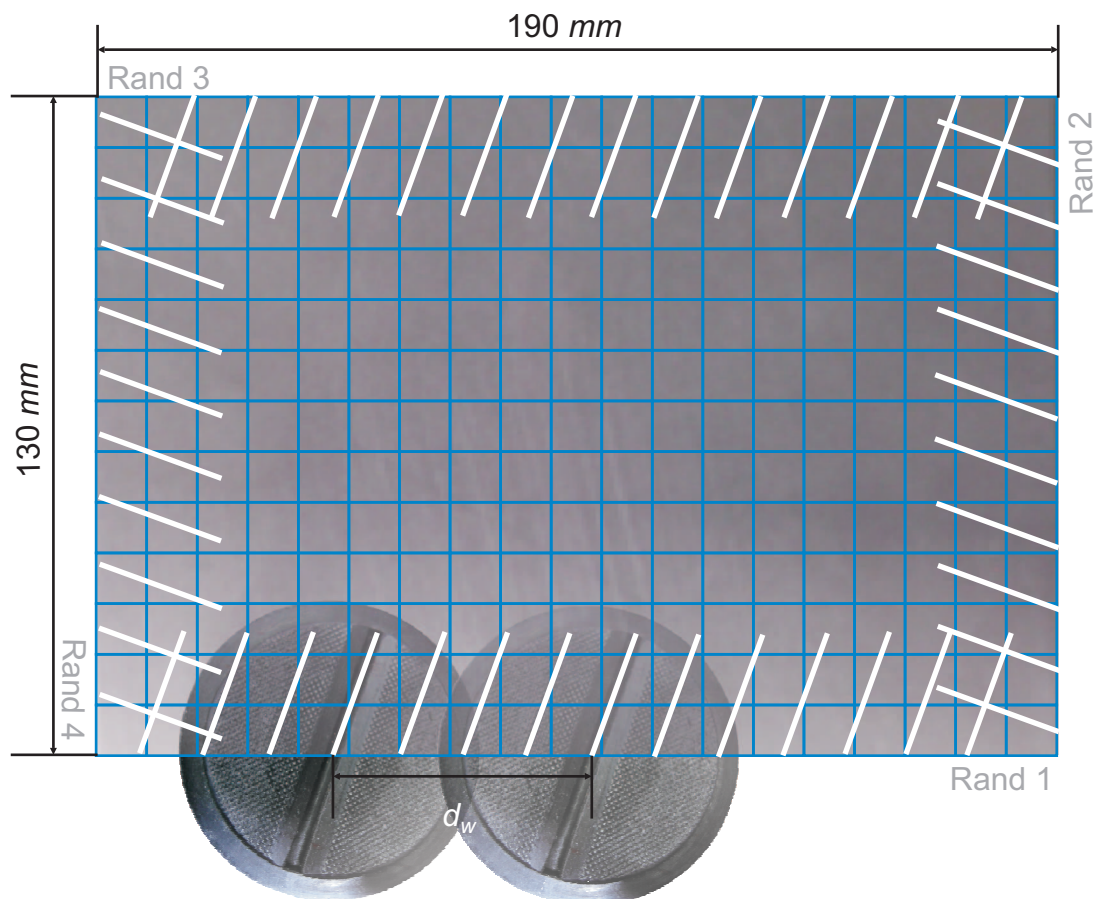


Abbildung 6.15: Blech mit den Schlagparametern ( $d_s = 0,25 d_w$ ,  $u_s = 0,5 d_w$ ,  $\gamma_s = 20^\circ$ ) und der Schlagreihenfolge von Rand 1  $\rightarrow$  Rand 2  $\rightarrow$  Rand 3  $\rightarrow$  Rand 4. Die weißen, schräg stehenden Striche bezeichnen die Schlagpositionen der Schläge.

Die verformten Bleche werden anschließend mit dem GOM ATOS-Messsystem vermessen. Sie haben den gleichen Werkstoff *DC04* und die gleiche Dicke von 1 *mm* wie bei den Verifizierungsversuchen im letzten Abschnitt.

### 6.2.2.2 Versuchs- und Berechnungsergebnisse

Zur Identifizierung der Modellkennlinien findet zu jedem verformten Blech eine entsprechende Berechnung mit dem geometrischen Stauchmodell statt. Dazu werden die gleichen Randbedingungen und Prozessparameter vorausgesetzt. Als Eingabe des Modells liegt die Stauchung  $\delta$  im Wertebereich (0, 1). Durch das Variieren der Stauchung ergeben sich zu jeder digitalen Blechgeometrie mehrere aus dem Modell berechnete Geometrien. Der Geometrievergleich zwischen Versuch und Modell wird mittels der „Best-Fit“-Funktion durchgeführt. Als Ergebnis zeigt beispielsweise Abbildung 6.16 eine typische Identifikationskurve. Bei dem Minimum der Kurve beschreibt der Wert die identifizierte Stauchung. Zugeordnet wird dieser Stauchung die Stößelverstellung des Versuches. So entstehen die Modellkennlinien unter definierten Randbedingungen.

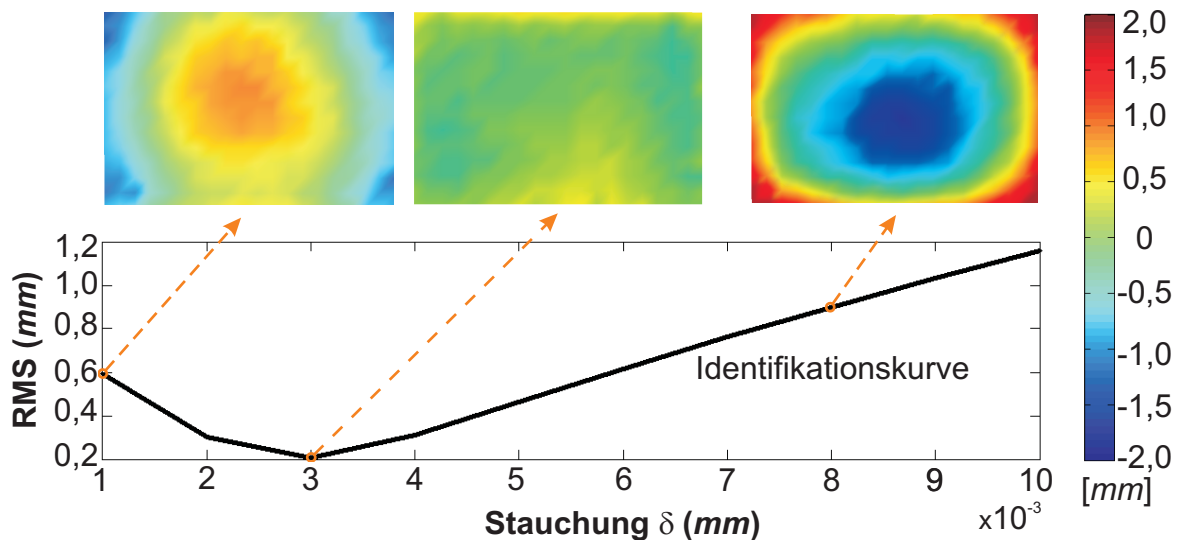


Abbildung 6.16: Identifikationskurve mittels Best-Fit-Analyse. Hierbei wird für die vorgegebene Stößelverstellung die Stauchung  $\delta = 0,003$  mm identifiziert. (RMS: „Root Mean Square“)



Nach dieser Identifizierungsmethode wird in Abbildung 6.17 die Beziehung zwischen Stauchung und Stößelverstellung über unterschiedliche Schlagabstände  $d_s$  bei den jeweiligen Werkzeugüberdeckungen  $u_s$  und Schlagausrichtungen  $\gamma_s$  gezeigt.

Abbildung 6.17 zeigt, dass eine Umformung des Bleches stark von dem Schlagabstand abhängt. In der Tat verfestigt sich das Blech um die Umformzone nach einer Stauchoperation. Prinzipiell verkleinert die Materialverfestigung eine nachfolgende Umformung mit der gleichen Schlagstärke, wenn sich der Schlag im Bereich der bereits entstandenen Umformzone befindet. Das heißt, je kleiner der Schlagabstand ist, desto kleiner ist die Stauchung. Die Diagramme (e) und (f) zeigen diese typische Tendenz bei der Werkzeugüberdeckung von  $0,9 d_w$  und der Schlagausrichtung von  $\gamma_s = (0^\circ; 20^\circ)$ . Allerdings kann beim Stauchen mit einem kleineren Schlagabstand eine größere Haftreibungskraft auf der raueren Blechoberfläche erzeugt werden. Insofern sinkt die Wahrscheinlichkeit einer Gleitreibung zwischen Blech und Stauchwerkzeug. Bei hintereinander ausgelösten Schlägen mit einem kleineren Schlagabstand sind die Kontaktflächen zum Werkzeug durchschnittlich rauer. Aus dieser erhöhten Oberflächenrauigkeit kann eine größere Stauchung resultieren, was besonders bei einer kleinen Stößelverstellung und/oder Werkzeugüberdeckung zu erkennen ist.

Des Weiteren zeigt sich, dass bei gleichem Schlagabstand und gleicher Stößelverstellung sowie Schlagausrichtung die Stauchung mit größerer Werkzeugüberdeckung ansteigt. Dies ist noch stärker bei der Schlagausrichtung von  $20^\circ$  erkennbar. Wie bereits erläutert, steht dabei das Werkzeug schräg zum Rand des Bleches (vergleiche Abbildung 6.3). Die Backen des Werkzeugs bewegen sich jedoch senkrecht zum Spalt aufeinander zu, weshalb das zu verformende Material an einer Seite des Spaltes eine geringere Überdrehung mit dem Werkzeug als bei der Schlagausrichtung von  $0^\circ$  aufweist. Dies ermöglicht eine größere Umformung. Falls das Werkzeug jedoch mit einem zu großen Winkel ausgerichtet wird, verkleinert sich die Stauchung entsprechend der verbleibenden Kontaktfläche (siehe Abbildung 6.18).

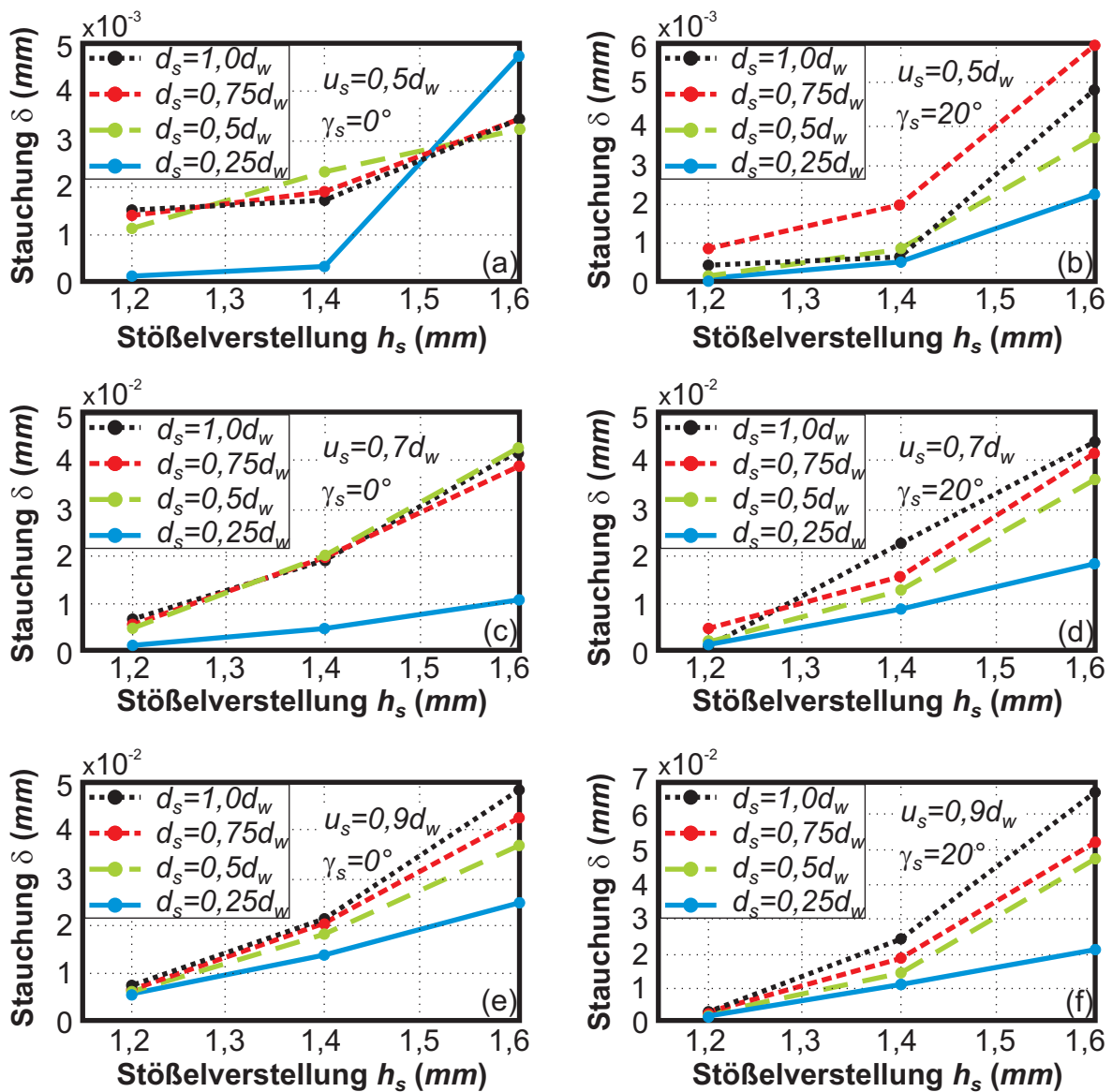


Abbildung 6.17: Identifikationsergebnisse mit unterschiedlichen Parametersätzen von dem Schlagabstand  $d_s = (0,25; 0,5; 0,75; 1,0) d_w$ , der Werkzeugüberdeckung  $u_s = (0,5; 0,7; 0,9) d_w$  und der Schlagausrichtung  $\gamma_s = (0^\circ; 20^\circ)$ . ( $d_w$  ist der Werkzeughdurchmesser)

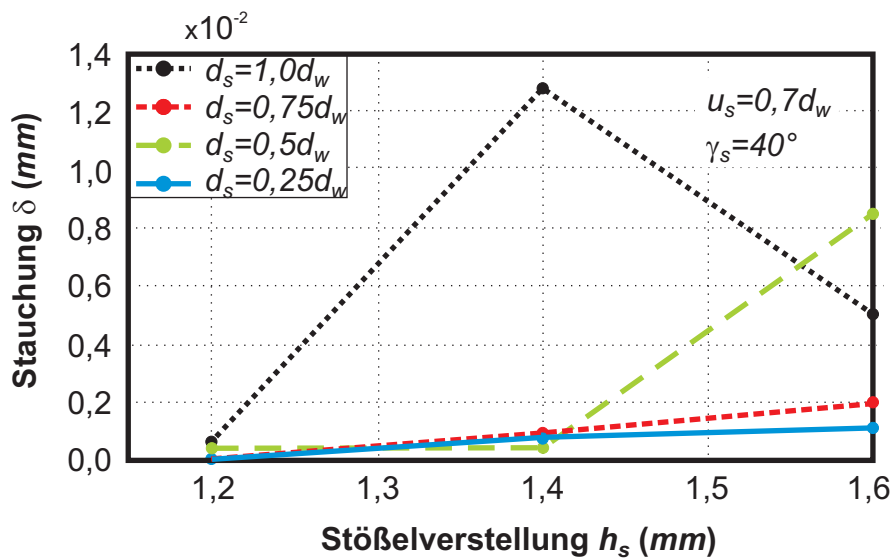


Abbildung 6.18: Identifikationsergebnisse mit der Schlagausrichtung  $\gamma_s = 40^\circ$  (vergleiche Abbildung 6.17 (c) und (d)).

Zudem beeinflusst der Werkzeugverschleiß jede einzelne Umformung. Während des Umformens wird das Vorderteil des Werkzeuges aufgrund der Werkzeugzugänglichkeit viel häufiger benutzt, so dass das Hinterteil weniger Abrieb an der Werkzeugoberflächenstruktur aufweist. Abbildung 6.19 zeigt die Ergebnisse der Versuche mit dem Werkzeughinterteil.

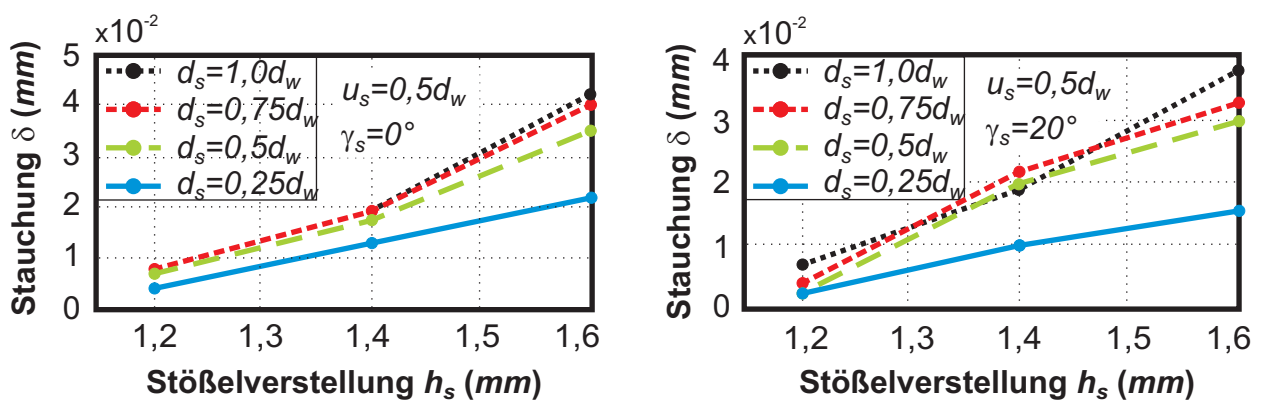


Abbildung 6.19: Identifikationsergebnisse der Versuche mit dem Werkzeughinterteil (bei einer Parametrisierung entsprechend Abbildung 6.17 (a) und (b)).

Im Vergleich zu den zwei oberen Diagrammen (a) und (b) der Abbildung 6.17 ist eine etwa 10fach größere Stauchung zu erkennen. Wie gezeigt, liegt dieser Extremfall bei einer Werkzeugüberdeckung von  $0,5 d_w$  vor. Bei einer größeren Werkzeugüberdeckung  $u_s$  ergibt sich dann ein kleinerer Größenunterschied der Stauchungen aufgrund der Mischung von mehr und weniger verschlissenen Bereichen.

### Standardisierung der Identifikationsversuche

Zur Erreichung des ursprünglichen Ziels, der Ermittlung einer simulationstauglichen Modellkennlinie entsprechend der Fließkurve bei der FEM-Simulation, ist eine Standardisierung der Versuche erforderlich. Damit kann der Zusammenhang zwischen der Stauchung und der Schlagstärke einfach und effektiv bestimmt werden. Es ist sinnvoll, dabei nur den kleinsten Schlagabstand  $d_s = 0,25 d_w$  zu verwenden, da davon ein größerer Schlagabstand im Schlagparametersatz durch das Einstellen der Stößelverstellung abgeleitet werden kann.

Ist die Schlagausrichtung  $\gamma_s$  ungleich  $0^\circ$ , muss der Roboter eine zusätzliche Drehung um das Werkzeugzentrum durchführen, was zu einer größeren Ungenauigkeit der Positionierung des umzuformenden Bleches führen kann. Um dies zu vermeiden, wird der Werkzeugspalt senkrecht zum Blechrand gewählt. Die Ergebnisse bei einer Werkzeugüberdeckung von  $0,9 d_w$  zeigen keinen nennenswerten Unterschied zu  $0,7 d_w$ . Deshalb wird für die Standardisierung  $u_s = 0,7 d_w$  herangezogen. Die im Abschnitt 2.1 beschriebene Zustellung des Kraftformers von  $22 \text{ mm}$  soll unverändert bleiben und die Stößelverstellung  $h_s$  in fünf Stufen ( $1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6 \text{ mm}$ ) variieren. Statt einer Interpolation der in Abbildung 6.17 dargestellten Beziehung zwischen Stauchung und Stößelverstellung werden für die Stößelverstellung  $1,3 \text{ mm}$  und  $1,5 \text{ mm}$  zwei zusätzliche Versuche durchgeführt. Da bei  $u_s = 0,7 d_w$  ein gewisser Umformunterschied bezüglich Vorder- und Hinterteil des Werkzeuges besteht, werden die oben definierten Standardversuche auch mit dem Werkzeughinterteil durchgeführt. Insgesamt ergeben sich die folgenden Modellkennlinien aus Abbildung 6.20. Die zwei Modellkennlinien liegen zwar bei niedriger Stößelverstellung nah beieinander und werden aber für die modellbasierte

Optimierung der Prozessparameter verwendet, weil der Unterschied sich bei größerer Stößelverstellung auswirkt.

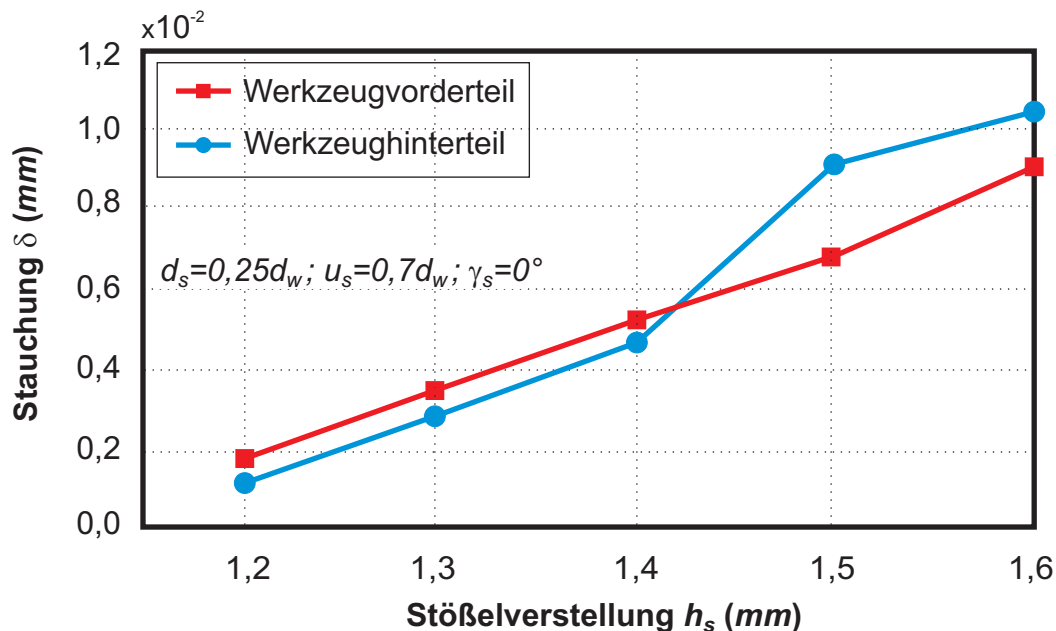


Abbildung 6.20: Identifikationsergebnisse der standardisierten Versuche jeweils mit dem Werkzeugvorder- und -hinterteil.

## 6.2.3 Fertigungsgenauigkeit

### 6.2.3.1 Versuchsdefinition und -durchführung

Im letzten Abschnitt wurden bei der Identifizierung der Modellkennlinien (siehe Abbildung 6.20) der Schlagabstand  $d_s$ , die Werkzeugüberdeckung  $u_s$  und die Schlagausrichtung  $\gamma_s$  jeweils auf  $0,25 d_w$ ,  $0,7 d_w$  und  $0^\circ$  festgelegt. Mit diesen Parametern können bezüglich eines ebenen Ausgangsblechs die verteilten Schlagparameter initialisiert werden. Um die robotergreifende Fertigung bezüglich der Fertigungsgenauigkeit mit dem Kopierverfahren vergleichbar machen zu können, wird das gleiche Versuchsbauteil bzw. das gleiche Ausgangsblech wie beim Kopierverfahren verwendet (siehe Abbildung 5.10). Anschließend wird die Optimierung der Schlagparameter mit einem im Abschnitt 6.1.2 beschriebenen genetischen Algorithmus durchgeführt. Aus dem op-

timalen Parametersatz werden die Steuerungsdaten generiert, die zur automatisierten Fertigung der Versuchsbleche erforderlich sind.

### 6.2.3.2 Berechnungs- und Versuchsergebnisse

In Abbildung 6.21 wird zur Optimierung der Prozessparameter der Evolutionsvorgang dargestellt. Als Gütemaß wurde der RMS („Root Mean Square“) der *Best-Fit*-Analyse verwendet. Die Berechnung wurde dabei mit einem groben und einem feinen Netz (jeweils mit dem Gitterabstand von 16 mm und 8 mm, vergleiche Abbildung 6.5) des digitalen Bleches durchgeführt, da die Genauigkeit und die Rechendauer vom Netzabstand der Geometrie-Simulation abhängig sind.

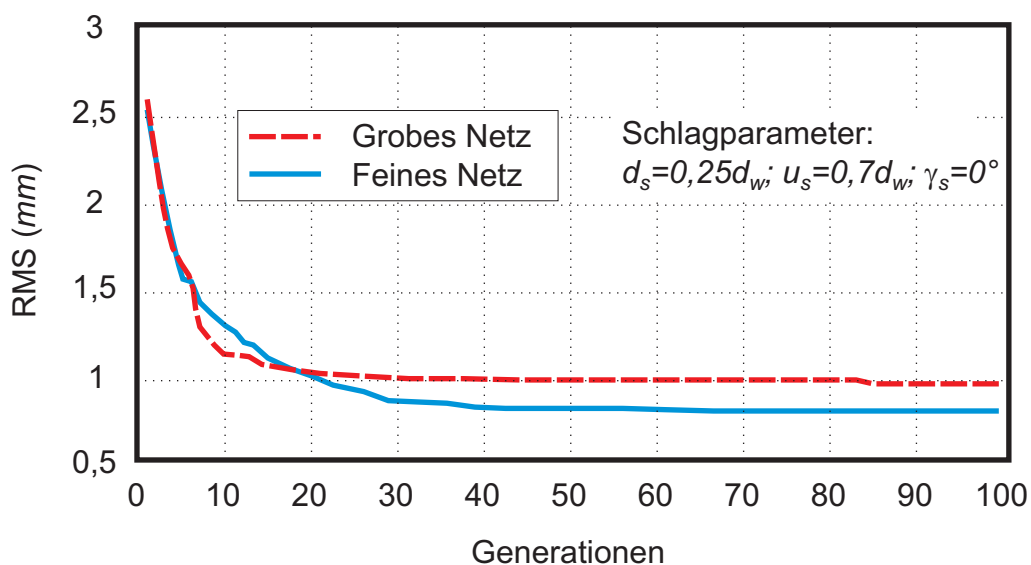


Abbildung 6.21: Evolutionsvorgänge unter Benutzung von zwei unterschiedlich dichten Netzen des umzuformenden Bleches, die nach mehreren Generationen unterschiedliche RMS erreicht haben. Das grobe Netz hat einen Gitterabstand von 16 mm und das feine Netz von 8 mm.

Bei den beiden Fällen verkleinert sich der RMS im Laufe der Zeit und erreicht sein Minimum nach ca. 40 Generationen. Da ein feines Netz die räumliche Geometrie des Bauteils genauer darstellt, kann ein niedrigerer Wert erzielt werden.

Das Verfahren weist einen relativ hohen Rechenaufwand auf, welcher sehr stark von der Granularität der Netze abhängt. Dies wird vor allem von der Feinheit der Netze bestimmt. Die in der oberen Abbildung dargestellten Ergebnisse benötigten bei Verwendung eines feinen bzw. groben Netzes bei einer üblichen Computerrechenleistung (Intel Core2 Duo 1,83 GHz; 2 GB Arbeitsspeicher) ca. 20 Minuten bzw. 3 Stunden. Aber auch die Anzahl der Populationsindividuen  $n_i$  beeinflusst die Rechendauer. Dies bedeutet jedoch nicht, dass der Programmablauf mit steigender Anzahl an Populationen mehr Rechenzeit benötigt. Eine hohe Evolutionsgeschwindigkeit kann dadurch erzielt werden, dass die Anzahl  $n_i$  angemessen ausgewählt wird. Bisher wird  $n_i$  empirisch bestimmt.

Aus diesen modellbasierten Berechnungen ergeben sich dann die Steuerungsdaten zur automatisierten Fertigung des Bauteils. Wie bereits erwähnt, wird die Geometrie des gefertigten Bauteils mittels GOM ATOS-Messsystem digitalisiert und dann mit dem Versuchsbauteil verglichen. Die Geometrieabweichungen werden in Abbildung 6.22 (rechts) dargestellt.

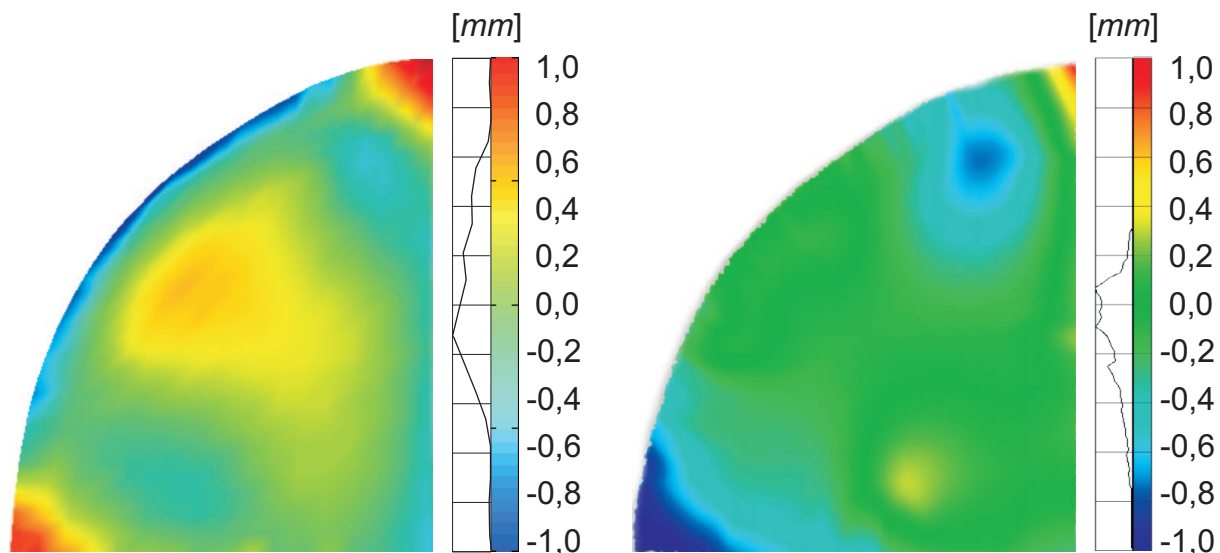


Abbildung 6.22: Links: Geometrieabweichung zwischen dem virtuell umgeformten Bauteil und dem vordefinierten Versuchsbauteil (siehe Abbildung 5.10). Rechts: Geometrieabweichung zwischen dem real gefertigten Bauteil und dem vordefinierten Versuchsbauteil. (Die Abmessung des Bleches steht in Abbildung 5.10).

Die linke Abbildung zeigt dabei die Geometrieabweichung zwischen dem virtuell umgeformten Bauteil und dem vordefinierten Versuchsbauteil (siehe Abbildung 5.10). Der RMS („Root Mean Square“) der Abweichungen beträgt ca. 0,9 mm. Dieser Wert ist mit den Versuchsergebnissen bei der Verifikation des geometrischen Stauchmodells in Kapitel 6.2.1 vergleichbar. Die Geometrieabweichungen des real gefertigten Bauteils zum gewünschten Versuchsbauteil ist der rechten Abbildung zu entnehmen. Es ist an dem Histogramm deutlich zu erkennen, dass das real umgeformte Bauteil eine höhere Fertigungsgenauigkeit hat. Die optimalen Schlagstärken für die jeweiligen Schlagpositionen, die durch die zwei Optimierungsvorgänge (der genetische Algorithmus und die „Best-Fit“-Analyse der 3D-Geometrie) gefunden wurden, sind den tatsächlichen Schlagstärken (bzw. -positionen) nahe liegend. Auf diese Suche nach optimalen Schlagparametern haben die Modellierungsfehler einen geringeren Einfluss als auf die Darstellbarkeit der realen Bauteilgeometrien. Zur Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit können die Identifikationsfehler reduziert werden.

### 6.3 Schlussfolgerung

Die Modellierung des Stauchens war der Schwerpunkt dieses Verfahrens. Das aufgestellte geometrische Stauchmodell beschrieb die Geometrieänderungen des Bleches nach einem Einzelschlag bzw. mehreren Schlägen und wurde bei der Analyse des Verfahrens durch die Prinzipversuche verifiziert. Nach der Identifizierung der Modellkennlinien war das Stauchmodell für die Simulation des Stauchprozesses verfügbar. Darauf basierend wurden die Prozessparameter modellbasiert optimiert. Die ermittelten Schlagpositionen und -stärken wurden zuerst in der virtuellen roboterunterstützten Arbeitsumgebung abgebildet und anschließend in die reale Umgebung transformiert. Daraus wurden die ausführbaren Steuerungsdaten erstellt, mit denen das vordefinierte Versuchsbauteil gefertigt wurde. Das Versuchsergebnis zeigt, dass im Vergleich zum Kopierverfahren das *vollautomatisierte* Verfahren bereits relativ hohe Fertigungsgenauigkeit erreicht hat. Es eignet sich besonders für die Einzelfertigung, was das Kopierverfahren wirtschaftlich nicht leisten kann.



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Automatisierung des inkrementellen Stauchens für die dreidimensionale Blechumformung. Mit dieser Erweiterung eröffnet das automatisierte *Kraftformerverfahren* eine neue Möglichkeit zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit im Bereich der Kleinserien- und Einzelteilerfertigung.

Die notwendige Vorarbeit fand in Form von mehreren Studien zur 2D-Blechumformung von L-förmigen Blechwinkeln statt. Es wurden zuerst die optischen Vermessungen sowie die virtuelle Abbildung der Blechwinkel erarbeitet. Der Einsatz der Steuerungs- und Regelungstechnik ermöglichte die automatisierte Blechfertigung des zweidimensionalen Umformprozesses. Dabei wurden sowohl das *modellfreie* als auch das *modellbasierte* Steuerungs- und/oder Regelungsprinzip verwendet.

Darauf aufbauend wurde das Kopierverfahren als modellfreie Methode für die dreidimensionale Blechumformung mittels *Kraftformerverfahrens* vorgestellt. Dazu wurde ein Tracking der manuellen Bauteilführungen angewendet und dabei die Schlagstärke des Kraftformers synchron der Schlagposition zugeordnet. Durch die „Roboter-Kamera“-Kalibrierung erfolgte die Transformation der erfassten Trackingdaten vom Kamera- ins Roboterkoordinatensystem. Dabei wurde durch den automatischen Kalibriervorgang eine systematische Erhöhung der Kalibrierungsgenauigkeit erreicht. Anschließend wurden die Umformtrajektorien aus den rohen Bauteilbewegungen extrahiert und zur Verringerung der Reibungskräfte zwischen dem Blech und dem Werkzeug mit Splines interpoliert. Durch Spiegelung der Bahndaten für ebenensymmetrische Bauteile ermöglichte der vorgestellte Fertigungsprozess die Vermeidung der manuellen Arbeitsschritte.

Das modellbasierte Verfahren basiert auf der geometrischen Modellierung des inkrementellen Stauchens. Das dabei notwendige Stauchmodell wurde durch die Identifikation der Modellkennlinien bereitgestellt. Zur Simulation des Stauchprozesses wer-

den die Prozessparameter mittels genetischer Algorithmen evolutionär ermittelt, um eine Zielgeometrie möglichst genau zu erreichen. Aus den Parametern ergaben sich die Schlagpositionen unmittelbar in der virtuellen Fertigungsumgebung. Diese werden anschließend zur Generierung der Steuerungsdaten in die reale Roboter-Kraftformer-Umgebung transformiert. Dazu sind die Roboterbahndaten bei der Translation und Rotation durch Spline bzw. Kreise interpoliert, um eine glatte robotergreifende Bauteilführung zu ermöglichen.

Es wurde gezeigt, dass die verwendete Trackingkamera keine exakte Position der für das Kopierverfahren notwendigen Marker lieferte. Die Streuung der erfassten Positionen sank mit der ansteigenden Anzahl der Messungen aber sehr schnell und war ab 200 Messungen vernachlässigbar. Ebenso stiegen die rotatorische und translatorische Kalibrierungsgenauigkeit mit der Anzahl an Kalibrierpunkten und Messungen. Dementsprechend wurde ein zeitlich längerer Roboter-Kamera-Kalibrierungsvorgang vorgesehen. Aus der Kalibrierung resultiert eine Transformationsmatrix, mit der die Umformtrajektorie vom Kamera- ins Roboterkoordinatensystem transformiert werden kann. Die Untersuchungen haben gezeigt, dass zur Erzielung einer hohen Kopiergenauigkeit eine ausreichend hohe Anzahl an Kalibrierpunkten bei der Kalibrierung vorzusehen sind. Bei diesem Verfahren hängt die Fertigungsgenauigkeit primär von der manuellen Fertigung ab. Der Kopierprozess ermöglichte das roboterunterstützte Nachahmen der manuellen Bauteilführung. Aus diesem Grund ist das Kopierverfahren in die Kategorie der *halbautomatisierten* inkrementellen Umformverfahren einzuordnen.

Der Schritt zum vollautomatisierten Verfahren wurde mit der Modellierung des Stauchprozesses erreicht. Die Ergebnisse der Verifikationsversuche zeigten niedrige Geometrieabweichungen zwischen dem Modell und der Realität. Die verbleibende Ungenauigkeit des Modells resultierte vor allem aus der Idealisierung der Umformzone. Das verwendete Modell beschrieb die Geometrieänderungen des umzuformenden Bleches, welches um die Modellkennlinie bzw. die Beziehung zwischen Schlagstärke und Stauchung ergänzt wurde. Zur Identifikation der Kennlinien wurde ein standardisierter Versuch vorgestellt. Die derart gewonnene Kennlinie wurde für die Optimierung der Pro-

zessparameter verwendet. Nachdem der Parametersatz für die Fertigungsaufgabe initialisiert wurde, lief die Optimierungsschleife evolutionär, bis das Abbruchkriterium erfüllt wurde. Bei jeder Schleife gab es den zweiten Optimierungsvorgang, und zwar die „Best-Fit“-Anpassung der modellberechneten Blechgeometrie an der Schablone. Mit den optimierten Prozessparametern konnten in der virtuellen Umgebung die Roboterbahndaten gewonnen werden. Aus den in die reale Umgebung transformierten Bahndaten ergaben sich die Steuerungsdaten zur automatisierten Blechfertigung. Das Versuchsergebnis zeigte, dass das mit diesen Steuerungsdaten gefertigte Bauteil eine höhere Fertigungsgenauigkeit als bei der virtuellen Fertigung aufwies. Der Grund dafür ist, dass auf diese Suche nach optimalen Schlagparametern die Modellierungsfehler einen geringeren Einfluss als auf die Darstellbarkeit der realen Bauteilgeometrien haben.

Die beiden Verfahren erreichen bereits eine Fertigungsgenauigkeit von ca.  $\pm 1 \text{ mm}$ . Allerdings ist dafür in vielen Fällen noch eine Nachbearbeitung der gefertigten Bauteile erforderlich.

Das Kopierverfahren kann in der Zukunft dadurch optimiert werden, dass die Koordinatentransformation durch das direkte Handführen des Industrieroboters vereinfacht wird und dies zu einem Verzicht auf das Trackingsystem führt [Winkler2008]. Da in dieser Arbeitsweise für jede vorgegebene Variante der Bauteilgeometrie die manuelle Fertigung mindestens einmal durchgeführt werden muss, kann das Kopierverfahren erweitert werden, damit es sich auch wirtschaftlich für die Fertigung individueller Bauteile eignet. Dies kann durch das Katalogisieren der durch das Kopierprinzip gefertigten Bauteile erfolgen. Konkreterweise könnte eine Datenbank zum Speichern der bereits vorhandenen Bauteilgeometrien und zugehörigen Fertigungsparametersätze aufgestellt werden. Zur Fertigung eines neuen Bauteils könnte die Datenbank nach dem besten Matching der Zielgeometrie durchsucht werden. Der dabei gefundene Fertigungsparametersatz könnte parametrisch skaliert werden, so dass das zu fertigende Bauteil die Zielgeometrie genauer annähert. Zum Schluss bietet die Bauteilkatalogisierung in Konkurrenz zum modellbasierten Verfahren eine modellfreie Methode zur Fertigung von individuellen dreidimensionalen Bauteilen.

---

Grundsätzlich kann das modellbasierte Verfahren zur Fertigung der individuellen Bauteile eingesetzt werden. Für das Verfahren könnte in weiteren Arbeiten das Stauchmodell unter Berücksichtigung der Faltenbildungen, der abgerundeten Kegelspitze, der Schlagreihenfolge und der nicht an Rändern ausgelösten Schläge erweitert werden. Zum Ermitteln der Modellkennlinien könnten die Identifikationsversuche über mehr Kombinationsvarianten der Schlagparameter geplant werden. Außerdem könnte eventuell für die Feinheit der generierten Netze ein besserer Kompromiss zwischen der Rechenzeit und der Fertigungsgenauigkeit gefunden werden.

Unter dem Aspekt der Steuerungs- und Regelungstechnik befinden sich die beiden Verfahren derzeit in Steuerstrecken. In zukünftigen Arbeiten könnte zur Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit und -geschwindigkeit der Fertigungsprozess mithilfe eines optischen Messsystems, das die dreidimensionale Geometrie des zu fertigenden Bauteils in Echtzeit erfassen kann, überwacht werden. Somit können im Fertigungsprozess die Abweichungen der Bauteilgeometrien in Echtzeit ausgeregelt werden. Dies spiegelt im Wesentlichen das Prinzip der Prozessregelung in der Blechumformung von L-förmigen Blechen in anderen Arbeiten am Lehrstuhl für Umformtechnik wider.

## Abbildungsverzeichnis

1.1	<i>Brustschild einer Ritterrüstung. . . . .</i>	2
1.2	<i>Erstes Ganzmetallflugzeug. . . . .</i>	2
2.1	<i>Kraftformer und Konstruktionsdarstellung des Typs KF 330 „Piccolo“ [Eckold2001].</i>	5
2.2	<i>Stauch- und Streckwerkzeuge mit ihren Funktionen. Das Prinzip ist die Umlenkung der vertikalen Kraft durch die Hebel (rote Elemente) in die horizontale Richtung, damit die Backen horizontal zueinander (Stau- chen) oder auseinander (Strecken) bewegt werden [Eckold2003]. . . . .</i>	8
2.3	<i>Links: Umformung mittels Stauch-/Streckwerkzeug: Feinblech mit L-Profil in S-Form (links). Rechts: einfach bzw. doppelt gekrümmte Verkleidungs- blechteile im Schienenfahrzeugbau [Eckold2011]. . . . .</i>	9
2.4	<i>(a) Gestreckter L-förmiger Blechwinkel mit dem Umformwinkel <math>\theta</math>; (b) Kraft- übertragung vom Werkzeug zum Blech. (<math>F_v</math>: vertikale Kraft; <math>F_h</math>: horizon- tale Kraft; <math>F_r</math>: Reibkraft; <math>F_n</math>: Normalkraft; <math>\alpha</math>: Übertragungswinkel.) . .</i>	10
2.5	<i>Links: Vermessung der vertikalen Kraft <math>F_v</math> entlang der Zeit <math>t</math> beim Stau- chen mit einer Stößelverstellung von 3 mm. Rechts: Beziehung zwischen der maximalen vertikalen Kraft <math>F_{vm}</math> und der Stößelverstellung <math>h_s</math>. (Ver- suchsblech mit dem Werkstoff DC04 und einer Dicke von 1 mm; Zustel- lung = 22 mm) . . . . .</i>	11
3.1	<i>Versuchsplan des Kopierverfahrens und des modellbasierten Fertigungs eines 3D-Bauteils. . . . .</i>	22
4.1	<i>Abmessungen des verwendeten Kraftformers KF 330 „Piccolo“ [Kraftformer2003].</i>	23
4.2	<i>Drehachsen A1 bis A6 vom KUKA KR-30 [Kuka2004]. . . . .</i>	25
4.3	<i>Orientierung des Roboterflanschkoordinatensystems entsteht durch die dreimalige Verdrehung um Z-, Y- und X-Achse jeweils mit den Drehwin- keln A, B und C [Kuka2003]. . . . .</i>	26

---

4.4	<i>Entwickelter Greifer mit einem vordefinierten TCP („Tool Center Point“), der mit sogenannter Vier-Punkte-Methode im Roboterkoordinatensystem bestimmt wird [Kuka2004]. . . . .</i>	28
4.5	<i>Installation der Trackingkamera am Kraftformer. Das Messvolumen wird mit dem grünen, transparenten Overlay dargestellt [NDI2011]. (KKS: Kraftformerkoordinatensystem; CKS: Kamerakoordinatensystem) . . . . .</i>	30
4.6	<i>Markerbaum bestehend aus drei Markern und einem Gestell, auf dem Greifer befestigt. (MKS: Markerkoordinatensystem; <math>p_{1-3}</math>: Koordinaten der Marker; <math>a_0, b_0, c_0</math>: Länge zwischen zwei Markern) . . . . .</i>	32
4.7	<i>GOM ATOS-Messsystem besteht aus einem Scankopf, einem verstellbaren Stativ und der Software ATOS Professional [GOM2011]. . . . .</i>	33
4.8	<i>Benutzeroberfläche der Applikation TreibTec. . . . .</i>	36
5.1	<i>Prozessablauf des Kopierverfahrens. (CKS: Kamerakoordinatensystem; RKS: Roboterkoordinatensystem) . . . . .</i>	37
5.2	<i>Aufzeichnung der Bauteilbewegungen mittels des Trackingsystems. Gespeichert werden die Trajektorien im Kamerakoordinatensystem. Die Lage des Bleches entspricht der Schlagposition. . . . .</i>	39
5.3	<i>Durch eine Betätigung des Fußschalters werden ein Einzelschlag ausgelöst und gleichzeitig die Trackingdaten erfasst. Die Ausgabe nach der Synchronisierung hat das Format: (X, Y, Z, A, B, C, <math>h_s</math>). . . . .</i>	41
5.4	<i>Extrahierte Umformtrajektorien (rot) und die erfassten Bauteilbewegungen (blau) des TCP („Tool Center Point“) im Roboterkoordinatensystem (RKS). . . . .</i>	44
5.5	<i>Links: Spiegelung des Greiferkoordinatensystems durch Ebenen- und Drehspiegelungen. Rechts: Umformtrajektorie, Spiegelebene und gespiegelte Umformtrajektorie. . . . .</i>	47
5.6	<i>Messpunktwolken um den jeweiligen Marker mit ungleichmäßigen Streuungen in X, Y, Z-Richtung. . . . .</i>	49
5.7	<i>Abstandsabweichungen <math>\Delta V</math> und <math>\Delta D</math> entlang der Anzahl (<math>n_M</math>) an Messungen des Markerbaums. . . . .</i>	49

5.8	<i>(a) Translatorische Kalibrierungsabweichung <math>\Delta V</math> und (b) rotatorische Kalibrierungsabweichung <math>\Delta D</math> in Relation zu der Anzahl der Kalibrierpunkte <math>n_K</math> und Messungen <math>n_M</math>.</i>	52
5.9	<i>Laufzeit des Kalibriervorgangs in Relation zu der Anzahl der Kalibrierpunkte <math>n_K</math> und der Messungen <math>n_M</math>.</i>	53
5.10	<i>Abmessungen des Versuchsbauteils.</i>	54
5.11	<i>Kopiergenauigkeit in Abhängigkeit von der Anzahl der Kalibrierpunkte <math>n_K</math> (links: <math>n_K=10</math>; rechts: <math>n_K=30</math>). Die Abweichungen werden von der Farbskala und dem Histogramm dargestellt.</i>	55
5.12	<i>Abweichungen der Bauteiloberflächen zwischen links: zwei manuell gefertigten Bauteilen, rechts: zwei robotergreifend gefertigten Bauteilen. Die Abweichungen werden von der Farbskala und dem Histogramm dargestellt.</i>	56
6.1	<i>Prozessablauf der modellbasierten inkrementellen Blechumformung.</i>	58
6.2	<i>Links: Nach einem Stauchschlag verformt sich das ebene Blech. Die umzuformende Zone besitzt eine dreieckige Ausprägung. Rechts: Nach der Umformung fallen die beiden Dreieckschenkel zusammen. <math>F</math> ist die Umformkraft.</i>	60
6.3	<i>Links: Blech wird mit dem Stauchwerkzeug im Vorderteil (a) bzw. im Hinterteil (b) bearbeitet. Rechts: Parameter der Umformzone: Scheitelpunkt <math>\mathbf{p}_c</math>, Basismittelpunkt <math>\mathbf{p}_s</math> und Stauchung <math>\delta</math> sowie die Schlagausrichtung <math>\gamma_s</math>. Der Schlagabstand <math>d_s</math> bezeichnet den Abstand zwischen zwei nebeneinander ausgelösten Schlägen. <math>d_w</math> ist der Werkzeugbackendurchmesser.</i>	61
6.4	<i>Erzeugung der Kegelfläche ausgehend vom ebenen Blech nach einer Umformoperation. Korrespondierende Punkte: <math>\mathbf{p}_{2D}</math> und <math>\mathbf{p}_{3D}</math>, <math>\mathbf{p}_h</math> und <math>\mathbf{p}_g</math>.</i>	63

- 
- 6.5 *Modellberechnungen des Quadratbleches mit jeweils einem, zwei und drei Schlägen. Links: Das schwarze Gitter stellt das unverformte Blech dar, wobei die Umformzonen (roten Dreiecke) durch die Schlagpositionen und Stauchungen vordefiniert sind; das blaue Gitter zeigt die modellberechneten Ergebnisse in der X-Y-Ebene, welches der Gleichung (6.11) entsprechen. Rechts: Die dreidimensionalen Geometrien der jeweiligen verformten Bleche. . . . . 66*
- 6.6 *Modellbasierte Optimierung der Prozessparameter mittels des genetischen Algorithmus. . . . . 69*
- 6.7 *Links: Roboterkonfigurationsraum ([Kuka2005]) und der darin liegende Kraftformer. Rechts: Im Vergleich zur realen Arbeitsumgebung werden nur die Stauchwerkzeuge (zwei übereinander liegende Kreise), der Greifer (geschlossene Kontur mit verbundenen Liniensegmenten) und das Bauteil (auf der Greiferkontur festgebundene Fläche) virtuell dargestellt. (KS: Koordinatensystem; BKS: Basis-KS; KKS: Kraftformer-KS; RKS: Roboter-KS; GKS: Greifer-KS; TCP: „Tool Center Point“.) . . . . . 74*
- 6.8 *Definition der Referenzposition zum Koordinatenabgleich zwischen der realen und virtuellen Umgebung. Der Roboterarm wird manuell zu dieser Position gefahren, so dass eine Ecke des Bleches im Mittelpunkt der Werkzeugoberfläche liegt. Dabei werden die Roboterkoordinaten als  $(X_0, Y_0, Z_0, A_0, B_0, C_0)$  bezeichnet. (KS: Koordinatensystem; KKS: Kraftformer-KS; RKS: Roboter-KS; GKS: Greifer-KS; TCP: „Tool Center Point“; L, W: Länge, Breite des Bleches;  $L_G, W_G$ : Maße des Greifers) . . . . . 77*
- 6.9 *Links: Spline Interpolation im Vergleich zur linearen Interpolation (gestrichelte Linien). Rechts: Kreisförmige Interpolation um das Zentrum der Werkzeugoberfläche im Vergleich zur linearen Interpolation (gestrichelte Linien.) . . . . . 79*



- 
- 6.10 *Versuchsbleche mit den vordefinierten Schlägen zur Verifizierung des geometrischen Stauchmodells. Kategorie (a): zwei gleiche Quadratbleche ( $88\text{ mm} \times 88\text{ mm}$ ) mit den unterschiedlichen Schlagausrichtungen  $0^\circ$  und  $40^\circ$ ; Kategorie (b): zwei gleiche Schläge auf dem Rechteckblech ( $88\text{ mm} \times 176\text{ mm}$ ); Kategorie (c): zwei gleiche Quadratbleche ( $176\text{ mm} \times 176\text{ mm}$ ) mit den gleichen Schlägen, aber den umgekehrten Schlagreihenfolgen (schwarze und weiße Pfeile im Kreislauf). . . . .* 81
- 6.11 *Versuch: Ein Einzelschlag ist auf dem Quadratblech ( $88 \times 88\text{ mm}^2$ ) mit der Schlagausrichtung  $\gamma_s = 0^\circ$  ausgelöst worden. Links: das umgeformte Blech. Rechts: die Geometrieabweichungen zwischen Modell und Versuch. . . . .* 83
- 6.12 *Versuch: Ein Einzelschlag ist auf dem Quadratblech ( $88 \times 88\text{ mm}^2$ ) mit der Schlagausrichtung  $\gamma_s = 40^\circ$  ausgelöst worden. Links: das umgeformte Blech. Rechts: die Geometrieabweichungen zwischen Modell und Versuch. . . . .* 83
- 6.13 *Versuch: Zwei Schläge wurden auf dem Rechteckblech ( $88 \times 176\text{ mm}^2$ ) ausgelöst: Geometrieabweichungen zwischen Modell und Versuch. . . .* 84
- 6.14 *Versuch: Schläge sind in gegenläufigen Reihenfolgen auf den zwei gleichen Quadratblechen ( $176 \times 176\text{ mm}^2$ ) ausgelöst worden. Links: die Geometrieabweichungen zwischen den vom Modell generierten Geometrien. Rechts: die Geometrieabweichungen zwischen den umgeformten Blechen. . . . .* 84
- 6.15 *Blech mit den Schlagparametern ( $d_s = 0,25 d_w$ ,  $u_s = 0,5 d_w$ ,  $\gamma_s = 20^\circ$ ) und der Schlagreihenfolge von Rand 1  $\rightarrow$  Rand 2  $\rightarrow$  Rand 3  $\rightarrow$  Rand 4. Die weißen, schräg stehenden Striche bezeichnen die Schlagpositionen der Schläge. . . . .* 86
- 6.16 *Identifikationskurve mittels Best-Fit-Analyse. Hierbei wird für die vorgegebene Stößelverstellung die Stauchung  $\delta = 0,003\text{ mm}$  identifiziert. (RMS: „Root Mean Square“). . . . .* 87

---

6.17	<i>Identifikationsergebnisse mit unterschiedlichen Parametersätzen von dem Schlagabstand <math>d_s = (0,25; 0,5; 0,75; 1,0) d_w</math>, der Werkzeugüberdeckung <math>u_s = (0,5; 0,7; 0,9) d_w</math> und der Schlagausrichtung <math>\gamma_s = (0^\circ; 20^\circ)</math>. (<math>d_w</math> ist der Werkzeugdurchmesser) . . . . .</i>	89
6.18	<i>Identifikationsergebnisse mit der Schlagausrichtung <math>\gamma_s = 40^\circ</math> (vergleiche Abbildung 6.17 (c) und (d)). . . . .</i>	90
6.19	<i>Identifikationsergebnisse der Versuche mit dem Werkzeughinterteil (bei einer Parametrisierung entsprechend Abbildung 6.17 (a) und (b)). . . . .</i>	90
6.20	<i>Identifikationsergebnisse der standardisierten Versuche jeweils mit dem Werkzeugvorder- und -hinterteil. . . . .</i>	92
6.21	<i>Evolutionsvorgänge unter Benutzung von zwei unterschiedlich dichten Netzen des umzuformenden Bleches, die nach mehreren Generationen unterschiedliche RMS erreicht haben. Das grobe Netz hat einen Gitterabstand von 16 mm und das feine Netz von 8 mm. . . . .</i>	93
6.22	<i>Links: Geometrieabweichung zwischen dem virtuell umgeformten Bauteil und dem vordefinierten Versuchsbauteil (siehe Abbildung 5.10). Rechts: Geometrieabweichung zwischen dem real gefertigten Bauteil und dem vordefinierten Versuchsbauteil. (Die Abmessung des Bleches steht in Abbildung 5.10). . . . .</i>	94

## Tabellenverzeichnis

4.1	<i>Technische Daten des Kraftformers mit der Modellbezeichnung: Eckold KR 330 Piccolo. . . . .</i>	24
4.2	<i>Achsdaten des KUKA-Roboters KR-30. . . . .</i>	25
4.3	<i>Technische Daten der Trackingkamera des Modells Polaris Vicra. . . . .</i>	31
4.4	<i>Technische Daten des angewendeten GOM ATOS-Messsystems. . . . .</i>	34
5.1	<i>Variation der Kalibrierungsparameter <math>n_K</math>: Anzahl der Kalibrierpunkte und <math>n_M</math>: Anzahl der Messungen um einen Kalibrierpunkt zur Untersuchung der Kalibrierungsgenauigkeit . . . . .</i>	51

---

## Literaturverzeichnis

[Besl1992] Besl, P. J.; McKay, N. D.:

A method for registration of 3D-shapes.

Proceedings of the IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 14, no. 2, pp. 239-256, 1992.

[Duflou2005] Duflou, J. R.; Callebaut, B.; Kruth, J. P.:

Laserforming of 3D Features Advanced Material Research, SHEMET 5, Nürnberg, 2005

[Eckold2001] Eckold AG:

Bedienungsanleitung und Ersatzteilliste.

Technisches Heft, Ausgabe 11, S. 36, 2001.

[Eckold2003] Eckold AG:

Universalmaschinen für die spanlose Kaltumformung von Blechen und Profilen - KF330, KF324.

Technisches Heft, Ausgabe 1, 2003.

[Eckold2011] Eckold AG:

[www.eckold.com](http://www.eckold.com), 2011.

[Farin1996] Farin, G.:

Curves and surfaces for computer aided geometric design.

Academic Press, Fourth edition, 1996.

[Fraunhofer2003] Fraunhofer IPA:

[www.roboshaping.de](http://www.roboshaping.de).

[Golle2007] Golle, M.; Hoffmann, H.; Lueth, T. C.; Scherer, D.; Weber, S.:

Driving as a Flexible Manufacturing Method for Mass Customization of Individualized Sheet Metal Products.

POMS 18th Annual Conference Dallas, Texas, USA, 2007.

[GOM2011] GOM mbH: ATOS - Hochauflösender optischer 3D-Scanner.

<http://www.gom.com/de/messsysteme/systemuebersicht/atos.html>.

[Hautmann2009] Hautmann, R.:

Modellierung der Blechumformung durch eine Kombination verschiedener inkrementeller Verfahren.

In DFG SPP 1146: Modellierung inkrementeller Umformverfahren, 2009.

[Hehenberger2011] Hehenberger, P.:

Computerunterstützte Fertigung - Eine kompakte Einführung.

Springer-Verlag Berlin Heidelberg, ISBN 978-3642134746, 2011.

[Hirt2002] Hirt, G.:

Komplizierte Bauteile ohne teure Werkzeuge herstellen.

Presse: campus - uni saarland, Ausgabe 2, 2002.

[Hirt2004] Hirt, G.; Ames, J.; Junk, S.:

Inkrementelle Blechumformung als wirtschaftliche Alternative zur Herstellung von Prototypen und Kleinserien.

19. Aachener Stahlkolloquium, Umformtechnik - Stahl und NE-Werkstoffe „Visionen und Innovative Lösungen“, 25./26.03.2004, Mainz. Tagungsband, Aachen, 2004.

[Kopp2005] Kopp, R.:

Bedeutung der Umformtechnik für einen modernen Industriestandort.

Deutsch-brasilianisches Technologie Forum, S. 18, Salvador, Brasilien, 2005.

[Kraftformer2003] Eckold AG:

Universalmaschinen für die spanlose Kaltformung von Blechen und Profilen.

Technische Daten KF330 KF324, Schweiz, 2003.

[Kuka2003] KUKA Roboter GmbH:

KRC2/KRC3 - Inbetriebnahme.

KUKA Software System (KSS), Release 5.2, 2003.

[Kuka2004] KUKA Roboter GmbH:

KR30-3, KR60-3, KR30L16.

Spezifikation, 2004.

[Kuka2005] KUKA Roboter GmbH:

KR30HA-KR60HA-KR60L45HA-KR60L30HA.

Technical Data, 2005.

[Lamminen2004] Lamminen, L; Tuomi, J:

Incremental Sheet Forming as a Method for Sheet Metal Component Prototyping and Manufacturing.

10èmes Assises Européennes des Prototypage Rapide-14/15, 2004.

[Meier2008] Meier, H., Smukala, V., Buff, B.:

Roboterbasierte inkrementelle Blechumformung - Bauteilgenauigkeitssteigerung in einem automatisierten industriellen Gesamtkonzept.

wt Werkstattstechnik online, Nr. 10, S. 831-836, 2008.

[NDI2011] NDI Polaris:

<http://www.ndigital.com/medical/polarisfamily-volumes-vicra.php>.

[Park1994] Park, F. C.; Martin, B. J.:

Robot Sensor Calibration: Solving  $AX=XB$  on the euclidean group.

Proceedings of the IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 10, no. 5, pp. 717-721, 1994.

[Poli2008] Poli, R.; Langdon, W. B.; McPhee, N. F.:

A field guide to genetic programming.

Lulu Enterprises, UK Ltd, ISBN 978-1409200734, 2008.

[Pottmann2004] Pottmann, H.; Leopoldseder, S.; Hofer, M.:

Registration without ICP.

Journal of Computer Vision and Image Understanding, vol. 95, no. 1, pp. 54-71, 2004.

[Schaefer2007] Schäfer, T.:

Verfahren zur hämmernden Blechumformung mit Industrieroboter.

Dissertation, Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart, 2007.

[Scherer2010] Scherer, D.; Yang, Z.; Hoffmann, H.:

Driving - A Flexible Manufacturing Method for Individualized Sheet Metal Products.

Key Engineering Materials, vol. 447-448, pp. 795-800, 2010.

[Scherer2013] Scherer, D.:

Inkrementelles Umformen mittels Kraftformer.

Eingereichte Dissertation, 2013.

[Strobl2006] Strobl, K. H.; Hirzinger, G.:

Optimal Hand-Eye Calibration.

Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS, pp. 4647-4653, Beijing, China, 2006.

[Tseng2003] Tseng, M.; Piller, F.T.:

The Customer Centric Enterprise.

Advances in Mass Customization and Personalization, Springer, New York, Berlin 2003.

[Westkämper2003] Westkämper, E.; Schraft, R. D.; Schaaf, W.; Schäfer, T.:

Roboshaping - Flexible inkrementelle Blechumformung mit Industrierobotern.

Wt Werkstattstechnik 93, Nr. 1/2, S. 7-11, 2003.

[Winkler2008] Winkler, A.:

Kraftbasierte Mensch-Roboter-Interaktion: Handführen von Industrierobotern.

Vdm Verlag Dr. Müller, ISBN 978-3639072860, 2008.

[Yang2007] Yang, Z.; Markert, M.; Scherer, D.; Golle, M.; Weber, S.; Hoffmann, H.; Lohmann, B.; Lüth, T. C.:

Driving Using A Cognitive Method For Production of Customized Sheet Metal Parts.

---

Proceedings of the IFAC Workshop on Manufacturing Modelling, Management and Control, pp. 199-204, Budapest, Hungary, 2007.

[Yang2008] Yang, Z.; Markert, M.; Scherer, D.; Golle, M.; Weber, S.; Hoffmann, H.; Lohmann, B.; Lüth, T. C.:  
A Human-Machine interactive Driving System.  
Proceedings of the IEEE International Conference on Distributed Human-Machine Systems, pp. 405-409, Athens, Greece, 2008.

[Yang2009a] Yang, Z.; Lohmann, B.:  
Modelling of the Driving Process of L-shaped Metal Sheets.  
Proceedings of the 6<sup>th</sup> Vienna International Conference on Mathematical Modelling MATHMOD 2009, pp. 339, Vienna, Austria, 2009.

[Yang2009b] Yang, Z.; Bürger, S.; Lohmann, B.:  
Automatisierung des Treibens mittels Diskreter Dynamischer Programmierung.  
Automatisierungstechnik, Heft 8, S. 377-385, 2009.



## 8 Anhang

### 8.1 Ermittlung der Transformationsmatrix $Q$

Die Komponente  $(R_Q, \mathbf{t}_Q)$  der Transformationsmatrix  $Q$  wird durch die Minimierung der beiden Gütekriterien  $\eta_1$  und  $\eta_2$  (siehe Gleichungen (5.6) und (5.7)) wie im Folgenden formuliert [Park1994]:

$$R_Q = (U^T \cdot U)^{-1/2} \cdot U^T, \quad (8.1)$$

$$\mathbf{t}_Q = (V^T \cdot V)^{-1} \cdot V^T \cdot W, \quad (8.2)$$

$$U = \sum_{i=1}^n \rho_i \cdot X_i^T, \quad (8.3)$$

$$V = \begin{pmatrix} E - R_{R1} \\ E - R_{R2} \\ \vdots \\ E - R_{Rn} \end{pmatrix}, \quad (8.4)$$

$$W = \begin{pmatrix} \mathbf{t}_{R1} - R_Q \cdot \mathbf{t}_{C1} \\ \mathbf{t}_{R2} - R_Q \cdot \mathbf{t}_{C2} \\ \vdots \\ \mathbf{t}_{Rn} - R_Q \cdot \mathbf{t}_{Cn} \end{pmatrix}. \quad (8.5)$$

Da  $\rho_i$  der Logarithmus von  $R_{Ri}$  und  $X_i$  der von  $\mathbf{t}_{Ci}$  ist, stellt ein  $\log R$  einen Vektor  $\mathbf{s} = (s_1, s_2, s_3)$  dar, dessen Elemente aus einer asymmetrischen Matrix  $S$  stammen:

$$S = \begin{pmatrix} 0 & -s_3 & s_2 \\ s_3 & 0 & -s_1 \\ -s_2 & s_1 & 0 \end{pmatrix} = \frac{\gamma}{2 \sin \gamma} (R - R^T) \quad (8.6)$$

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\text{trace}(R) - 1}{2}\right). \quad (8.7)$$

Dazu berechnet sich  $(U^T \cdot U)^{-1/2}$  wie folgt:

$$(U^T U)^{-1/2} = F^T \cdot E^{-1/2} \cdot F, \quad (8.8)$$

$E$  : Eigenwertmatrix,

$F$  : Eigenvektormatrix.

## 8.2 Best-Fit-Funktion

Zum Ermitteln der Rotationsmatrix  $R_b$  und des Translationsvektors  $\mathbf{t}_b$  werden zu Beginn die Punktwolken zum Ursprung des Koordinatensystems verschoben:

$$\mathbf{c}_1 = \frac{1}{n_p} \sum_{k=1}^{n_p} \mathbf{p}_k^e, \quad (8.9)$$

$$\mathbf{c}_2 = \frac{1}{n_p} \sum_{k=1}^{n_p} \mathbf{p}_k^m, \quad (8.10)$$

$$\mathbf{t}_{v1} = \mathbf{p}_k^e - \mathbf{c}_1, \quad (8.11)$$

$$\mathbf{t}_{v2} = \mathbf{p}_k^m - \mathbf{c}_2. \quad (8.12)$$

Die Matrix  $C_v$  wird durch das Kronecker-Produkt aus  $\mathbf{t}_{v1}$  und  $\mathbf{t}_{v2}$  berechnet:

$$C_v = \frac{1}{n_p} \sum_{k=1}^{n_p} \mathbf{t}_{v1} \otimes \mathbf{t}_{v2}. \quad (8.13)$$

Damit kann der Vektor  $\mathbf{d} = (a_{23}, a_{31}, a_{12})^T$  aus der Matrix  $A$

$$A = C_v - C_v^T = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix} \quad (8.14)$$

gebildet werden. Aus der Matrix  $Q$

$$Q = \begin{pmatrix} \text{tr}(C_v) & \mathbf{d}^T \\ \mathbf{d} & C_v + C_v^T - \text{tr}(C_v) \cdot I \end{pmatrix} \quad (8.15)$$

ergibt sich der zum maximalen Eigenwert von  $Q$  gehörige Eigenvektor  $V_m = (v_0, v_1, v_2, v_3)^T$ .

Schließlich werden die Rotationsmatrix  $R_b$  und der Translationsvektor  $\mathbf{t}_b$  wie folgt ermittelt:

$$R_b = \begin{pmatrix} v_0^2 + v_1^2 - v_2^2 - v_3^2 & 2(v_1 v_2 - v_0 v_3) & 2(v_1 v_3 + v_0 v_2) \\ 2(v_1 v_2 + v_0 v_3) & v_0^2 + v_2^2 - v_1^2 - v_3^2 & 2(v_2 v_3 - v_0 v_1) \\ 2(v_1 v_3 - v_0 v_2) & 2(v_2 v_3 + v_0 v_1) & v_0^2 + v_3^2 - v_1^2 - v_2^2 \end{pmatrix}, \quad (8.16)$$

$$\mathbf{t}_b = \mathbf{c}_2 - R_b \cdot \mathbf{c}_1. \quad (8.17)$$

Daraus wird der mittlere Geometrieabstand  $g$  (siehe Gleichung (4.13)) berechnet, der als Quadrat von RMS (engl.: „Root Mean Square“) bezeichnet wird.