

08

**Maschinenbau**  
Lehrstuhl für  
Umformtechnik  
und Gießereiwesen

Simon Josef Maier

# Inline-Qualitätsprüfung im Presswerk durch intelligente Nachfolgewerkzeuge

*Schriftenreihe Umformtechnik  
und Gießereiwesen*



*Simon Josef Maier*

# Inline-Qualitätsprüfung im Presswerk durch intelligente Nachfolgewerkzeuge

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen  
der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen  
Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

2. Prof. Dr. Pavel Hora (ETH Zürich)

Die Dissertation wurde am 05.07.2017 bei der Technischen  
Universität München eingereicht und durch die Fakultät für  
Maschinenwesen am 14.12.2017 angenommen.

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation  
in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliografische  
Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

## Impressum

1. Auflage

Copyright © 2018 der vorliegenden Ausgabe: TUM.University Press

Copyright © Simon Josef Maier

Alle Rechte vorbehalten

Herausgeber: Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg),  
Fakultät für Maschinenwesen, Technische Universität München

Reihe: Schriftenreihe Umformtechnik und Gießereiwesen

Layout und Gestaltung: utg/TUM.University Press

Layoutrichtlinien der Umschlaggestaltung: Designbuero Josef Grillmeier Munich

Umschlaggestaltung: Caroline Ennemoser

Umschlagabbildung: Simon Josef Maier

TUM.University Press

Verlag der Technischen Universität München

Arcisstraße 21

80333 München

ISSN: 2364-6942

ISBN: 978-3-95884-004-1

ISSN der digitalen Ausgabe: 2569-4928

DOI der digitalen Ausgabe: 10.14459/2018md1429197

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

## **Danksagung**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München im Rahmen eines Kooperations-Forschungsprojektes mit dem Presswerk Dingolfing der BMW Group.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, Leiter des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München, für das mir entgegengebrachte Vertrauen, für die wohlwollende Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit und die Freiheit, die mir in der Bearbeitung zugestanden wurde.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Pavel Hora, Leiter des Lehrstuhls für virtuelle Produktion der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, danke ich für die Übernahme des Koreferats, Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart für sein Interesse und die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Weiterhin gilt mein Dank allen Mitarbeitern der BMW Group, die durch wertvolle Diskussionen und tatkräftige Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Allen voran seien hier die Abteilungsleiter des Presswerks Dr. Thomas Kautz, Dr. Robert Cisek und Peter Wolferseder genannt. Den Herren Andi Liebig, Thomas Schmerbeck und Markus Wierer danke ich für Ihre Studienarbeiten und die hervorragende Zusammenarbeit.

Seitens des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen möchte ich mich bei allen Mitarbeitern für die freundschaftliche und produktive Zusammenarbeit bedanken. Herrn Christian Gaber möchte ich hervorheben, er betreute mich bereits während meiner Abschlussarbeit und hat mir diesen Weg ermöglicht.

Meinen Eltern, die mir durch ihre Unterstützung und Förderung meinen beruflichen Werdegang ermöglicht haben, ist diese Arbeit gewidmet. Sie gaben mir stets den Rückhalt, der zur Fertigstellung der vorliegenden Dissertation nötig war.

München, im Januar 2018

*Simon Maier*



*„If we wait, until we're ready, we'll be waiting for the rest of our life.“*

Lemony Snicket



## Resümee

Im Zuge von Industrie 4.0, die auch als vierte Industrierevolution bezeichnet wird, ist der Begriff „Digital Shadow“ bekannt geworden. Gemeint ist dabei der „Digitale Schatten“ von Produktionsmaschinen und -prozessen. Sämtliche relevanten Daten, beginnend mit der Uhrzeit bis hin zu lokalen Bauteiltemperaturen oder spezifischen Betriebsdaten, müssen dafür durch Sensoren aufgezeichnet werden. Die so gewonnene Datenbasis („Big Data“) wird anschließend mit dem Ziel durchforstet, mittels mathematischer Analysemethoden komplexe Ursache-Wirkungsketten abzuleiten und mit diesem Wissen Produktionsprozesse effizienter zu gestalten. Im Kern geht es also um eine umfangreiche Aufnahme und Analyse von Produktionsinformationen. Im Bereich der Umformtechnik fehlt es trotz zahlreicher wissenschaftlicher Arbeiten in der Vergangenheit heute noch an solchen Sensorsystemen. Sie müssen sowohl relevante Prozessinformationen generieren als auch die notwendige Robustheit für die raue Pressenumgebung aufweisen.

An diesem Punkt setzt die vorliegende Arbeit an. Ziel ist es, neue, robuste Messkonzepte für komplexe Karosserieteile im Presswerk zu entwickeln. Ein wesentliches Alleinstellungsmerkmal dieser Konzepte ist die Entscheidung, diese in die Nachfolgewerkzeuge zu integrieren. Dort sind sie einfacher einzubauen, leichter zu warten - folglich besonders für den Einsatz im Presswerk geeignet. Mit dem in dieser Arbeit erläuterten Messsystem können dadurch sowohl der Einlaufweg als auch die Bauteilgeometrie an den qualitätskritischen Punkten eines Türinnenbleches überwacht werden. Die Messgenauigkeit dieser Messkonzepte wird direkt im Serienbetrieb im Presswerk Dingolfing der BMW Group untersucht. In Abhängigkeit des Einbettungsgrades der Inline-Messsysteme in den regulären Presswerksbetrieb werden schließlich vielfältige Wirkungspotentiale zur Steigerung der Effizienz und Prozessstabilität am Beispiel realer Bauteile aktueller BMW-Modellreihen nachgewiesen. So konnten Qualitätsfehler durch präventive Prozesskorrekturen verhindert werden. Am Beispiel eines Seitenrahmens wurde die rückwirkende Fehleranalyse auf Basis der Inline-Messdaten aufgezeigt. Als höchste Integrationsstufe gilt die bereichsübergreifende Nutzung der Inlinesysteme und ihrer Messdaten. Durch den Einsatz während der Werkzeugeinrichtung im Werkzeugbau wurde ein solches Potential veranschaulicht.



## **Executive Summary**

Along with the fourth industrial revolution the term "Digital Shadow" was created. In that context the Digital Shadow describes all the relevant data acquisition for production machines and processes. Collected data can diversify from simple time related production information up to specific temperature and process information recorded by various sensors. A big data set is continuously being generated and analysed through mathematical algorithms. The main goal is to identify complex relations between input and output values, to optimize and stabilize challenging production processes. In the field of forming technology, especially for the production of car body parts, no process data acquisition system has been established in serial production, yet. In the past there have been many unique approaches to collect the relevant data in press shops. Regardless all systems don't fulfil the demands for a rough production environment.

That is where this study comes into play. The outstanding feature is to develop a reliable sensor system for press shops, where all sensors are integrated into the following press tools. Therefore the measuring system had to proof its reliability and easy maintenance to be accepted during daily production. A unique concept for measuring the part specific material flow, as well as the parts geometry was invented. The measuring system has been tested under serial production conditions in a press shop of the BMW Group. Depending on the level of implementation of the inline-measuring system into the production process, a great variety of potential improvements concerning efficiency and process stability could be shown. With the pilot system, quality issues could be controlled through preemptive process corrections. For a car side-panel the practice of retroactive error analysis was explained. The highest level of integration is the cross-departmental use of this system and its information. An example where process data is being used in different departments round up this research. The tool shop uses process data generated during construction and various simulations to improve their workflow during the setup of new press-tools.



# Inhaltsverzeichnis

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Verzeichnis der Kurzzeichen.....</b>                 | <b>XVII</b> |
| <b>Verzeichnis der Abkürzungen.....</b>                 | <b>XIX</b>  |
| <b>1 Einleitung.....</b>                                | <b>1</b>    |
| <b>2 Stand der Technik .....</b>                        | <b>3</b>    |
| 2.1 Herstellung von Karosserieteilen.....               | 3           |
| 2.1.1 Karosserieherstellungsprozess .....               | 3           |
| 2.1.2 Tief- und Streckziehen .....                      | 5           |
| 2.1.3 Werkzeugtechnik .....                             | 7           |
| 2.1.4 Pressensysteme.....                               | 10          |
| 2.1.5 Einflussgrößen .....                              | 11          |
| 2.2 Qualitätsprüfung im Presswerk .....                 | 13          |
| 2.2.1 Einteilung der Qualitätsfehler .....              | 13          |
| 2.2.2 Maßabweichungen .....                             | 14          |
| 2.2.3 Oberflächenfehler .....                           | 15          |
| 2.2.4 Herstellbarkeitsprobleme .....                    | 17          |
| 2.3 Inline-Qualitätsprüfung und Prozessüberwachung..... | 18          |
| 2.3.1 Inline-Messtechnik im Presswerk .....             | 18          |
| 2.3.2 Geometriemessung.....                             | 19          |
| 2.3.3 Riss- und Faltenprüfung .....                     | 20          |
| 2.3.4 Stoffflussmessung .....                           | 21          |
| 2.3.5 Geschlossener Regelkreis .....                    | 24          |
| 2.3.6 Modellbasierte Regelung und Data-Mining.....      | 25          |
| 2.4 Umformsimulation.....                               | 26          |
| 2.5 Bildverarbeitung und Kantendetektion .....          | 27          |
| 2.6 Fazit .....   | 29          |
| <b>3 Vorgehensweise und Struktur der Arbeit .....</b>   | <b>31</b>   |
| 3.1 Zielsetzung .....                                   | 31          |
| 3.2 Vorgehensweise.....                                 | 32          |
| <b>4 Versuchsbauteil.....</b>                           | <b>35</b>   |
| 4.1 Wahl des Versuchsbauteils .....                     | 35          |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 4.2      | Herstellungsprozess .....                                       | 36        |
| 4.3      | Qualitätskritische Bereiche .....                               | 38        |
| 4.3.1    | Maßabweichung .....   | 38        |
| 4.3.2    | Risse, Falten und Welligkeiten .....                            | 42        |
| 4.4      | Werkstoff .....   | 44        |
| 4.4.1    | Technische Lieferbedingungen .....                              | 44        |
| 4.4.2    | Versuche zur Materialcharakterisierung .....                    | 46        |
| 4.5      | Analyse des Umformprozesses .....                               | 46        |
| 4.5.1    | Simulation der Ziehstufen .....                                 | 47        |
| 4.5.2    | Analyse des Realprozesses .....                                 | 48        |
| 4.5.3    | Abgleich von Simulation und Realität .....                      | 50        |
| 4.5.4    | Sensitivität des Einlaufverhaltens .....                        | 54        |
| 4.6      | Zusammenfassung: Identifikation der Masterpunkte .....          | 55        |
| <b>5</b> | <b>Entwicklung und Umsetzung des Pilotsystems .....</b>         | <b>57</b> |
| 5.1      | Überwachung geometrischer Merkmale in Nachfolgewerkzeugen ..... | 57        |
| 5.1.1    | Grundkonzept .....  | 57        |
| 5.1.2    | Auswahl der Abstandssensoren .....                              | 59        |
| 5.1.3    | Integration der Wirbelstromsensoren .....                       | 62        |
| 5.1.4    | Berechnung der Bauteilverdrehung .....                          | 65        |
| 5.2      | Überwachung des Einlaufweges in Nachfolgewerkzeugen .....       | 69        |
| 5.2.1    | Grundkonzept .....  | 69        |
| 5.2.2    | Auswahl der Sensorkameras .....                                 | 71        |
| 5.2.3    | Integration der Sensorkameras .....                             | 72        |
| 5.2.4    | Berechnung der Anhaukantenposition .....                        | 73        |
| 5.3      | Visualisierung der Messergebnisse .....                         | 75        |
| <b>6</b> | <b>Validierung des Pilotsystems im Serienbetrieb .....</b>      | <b>77</b> |
| 6.1      | Messgenauigkeit der Geometriemessung .....                      | 78        |
| 6.1.1    | Analyse der Wiederholgenauigkeit .....                          | 78        |
| 6.1.2    | Erfassung von Prozessschwankungen .....                         | 83        |
| 6.1.3    | Vergleich mit Prüfstand- und Messraumergebnissen .....          | 88        |
| 6.2      | Messgenauigkeit der Anhaukantendetektion .....                  | 91        |
| 6.2.1    | Analyse der Wiederholgenauigkeit .....                          | 91        |
| 6.2.2    | Reaktion auf Prozessschwankungen .....                          | 92        |
| 6.2.3    | Vergleich mit manuellen Messungen .....                         | 94        |

|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 6.3      | Vergleich der entwickelten Messkonzepte .....                               | 97         |
| <b>7</b> | <b>Potentiale der entwickelten Systeme für den Produktionseinsatz .....</b> | <b>101</b> |
| 7.1      | Präventive Korrektur des Produktionsprozesses .....                         | 102        |
| 7.2      | Passive Prozessüberwachung durch Anhauskantendetektion am Seitenrahmen ..   | 104        |
| 7.3      | Überwachung der Bauteilgeometrie für die Mehrfachteilefertigung .....       | 108        |
| 7.4      | Nutzung von Inline-Messtechnik im Einarbeitungsprozess.....                 | 110        |
| 7.5      | Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für den Serieneinsatz .....                  | 115        |
| <b>8</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>                                    | <b>119</b> |
| <b>A</b> | <b>Anhang .....</b>   | <b>123</b> |
| <b>B</b> | <b>Abbildungsverzeichnis .....</b>  | <b>129</b> |
| <b>C</b> | <b>Tabellenverzeichnis.....</b>   | <b>135</b> |
| <b>D</b> | <b>Literaturverzeichnis .....</b>   | <b>137</b> |



## Verzeichnis der Kurzzeichen

| Formelzeichen | Einheit           | Bedeutung   |
|---------------|-------------------|---|
| $A$           | -                 | Drehmatrix  |
| $A_{80}$      | %                 | Bruchdehnung  |
| $A_g$         | %                 | Gleichmaßdehnung                                      |
| $d_0$         | mm                | Stempeldurchmesser beim Tiefziehen                    |
| $d_{Nenn}$    | mm                | Nenndurchmesser des Wirbelstromsensors                |
| $D_0$         | mm                | Rondendurchmesser beim Tiefziehen                     |
| $F_{BH}$      | N                 | Blechhalterkraft                                      |
| $k_f$         | N/mm <sup>2</sup> | Wahre Spannung  |
| $n$           | -                 | Verfestigungsexponent                                 |
| $r$           | -                 | Mittlere, senkrechte Anisotropie                      |
| $r_M$         | mm                | Matrizenradius  |
| $R_{1552}$    | mm                | Maßabweichung im Schwellerbereich                     |
| $R_{1553}$    | mm                | Maßabweichung im Fensterrahmen                        |
| $R_a$         | $\mu m$           | Arithmetischer Mittenrauwert                          |
| $R_m$         | N/mm <sup>2</sup> | Zugfestigkeit   |
| $R_{p0,2}$    | N/mm <sup>2</sup> | 0,2 % Streckgrenze                                    |
| $s_{Gi}$      | mm                | Differenz der Abstands-Messwerte des Sensors $G_i$    |
| $s_{Gi}^g$    | mm                | Messwert des Sensors $G_i$ bei geschlossenem Werkzeug |
| $s_{Gi}^o$    | mm                | Messwert des Sensors $G_i$ bei offenem Werkzeug       |
| $s_{Rj}$      | mm                | Differenz der Abstands-Messwerte des Sensors $R_j$    |
| $s_{Rj}^g$    | mm                | Messwert des Sensors $R_j$ bei geschlossenem Werkzeug |
| $s_{Rj}^o$    | mm                | Messwert des Sensors $R_j$ bei offenem Werkzeug       |
| $t$           | s                 | Zeit  |
| $x$           | mm                | x-Koordinate des Fahrzeugkoordinatensystems           |
| $x_B$         | mm                | x-Koordinate des Bauteilkoordinatensystems            |
| $x_{Gi}^W$    | mm                | x-Position des Sensors $G_i$ in $W$                   |
| $x_{Rj}^W$    | mm                | x-Position des Sensors $R_j$ in $W$                   |
| $x_W$         | mm                | x-Koordinate des Werkzeugkoordinatensystems           |
| $y$           | mm                | y-Koordinate des Fahrzeugkoordinatensystems           |
| $y_B$         | mm                | y-Koordinate des Bauteilkoordinatensystems            |
| $y_{Gi}^W$    | mm                | y-Position des Sensors $G_i$ in $W$                   |

---

|                  |    |  |
|------------------|----|--|
| $y_{Rj}^W$       | mm | y-Position des Sensors $Rj$ in $W$                         |
| $y^W$            | mm | y-Koordinate des Werkzeugkoordinatensystems                |
| $z$              | mm | z-Koordinate des Fahrzeugkoordinatensystems                |
| $z_B$            | mm | z-Koordinate des Bauteilkoordinatensystems                 |
| $z_{Gi}^W$       | mm | z-Position des Sensors $Gi$ in $W$                         |
| $z_{Rj}^W$       | mm | z-Position des Sensors $Rj$ in $W$                         |
| $z^W$            | mm | z-Koordinate des Werkzeugkoordinatensystems                |
| $\vec{g}_i^W$    | mm | Position eines Geometriepunktes $i$                        |
| $\vec{r}_j^W$    | mm | Position eines Referenzpunktes $j$                         |
| $\vec{s}_{Gi}^W$ | mm | Sensor-Ergebnisvektor eines Geometriepunktes $i$           |
| $\vec{s}_{Rj}^W$ | mm | Sensor-Ergebnisvektor eines Referenzpunktes $j$            |
| $\vec{x}_{Gi}^W$ | mm | Sensor-Positionsvektor eines Geometriepunktes $i$          |
| $\vec{x}_{Rj}^W$ | mm | Sensor-Positionsvektor eines Referenzpunktes $j$           |
| $\alpha_{Gi}^W$  | °  | Ausrichtungswinkel des Sensors $Gi$                        |
| $\alpha_{Rj}^W$  | °  | Ausrichtungswinkel des Sensors $Rj$                        |
| $\beta$          | -  | Grenzziehverhältnis  |
| $\varphi$        | -  | Umformgrad   |
| $\varphi_1$      | -  | Hauptformänderung  |
| $\varphi_2$      | -  | Nebenformänderung  |
| $\phi$           | °  | Drehwinkel der y-Achse zur Transformation von $W$ nach $B$ |
| $\mu$            | -  | Reibzahl im Coulombschen Reibmodell                        |
| $\xi$            | °  | Drehwinkel der x-Achse zur Transformation von $W$ nach $B$ |
| $\psi$           | °  | Drehwinkel der z-Achse zur Transformation von $W$ nach $B$ |

---

## Verzeichnis der Abkürzungen

|            |   |
|------------|---|
| Abpressung | Fertigungstermin an der Produktionspresse                       |
| AFO        | Arbeitsfolge der Karosserieteilfertigung                        |
| AFO10      | Erste Arbeitsfolge des Platinenschnittes                        |
| AFO15      | Zweite Arbeitsfolge mit Umformoperationen                       |
| AFO20      | Dritte Arbeitsfolge mit weiteren Umform- oder Trennoperationen  |
| AFO25      | Vierte Arbeitsfolge mit weiteren Umform- oder Trennoperationen  |
| AFO30      | Fünfte Arbeitsfolge mit weiteren Umform- oder Trennoperationen  |
| AFO35      | Sechste Arbeitsfolge mit weiteren Umform- oder Trennoperationen |
| BMW        | Bayrische Motoren Werke   |
| Coil       | Aufgewickeltes Blechband  |
| FEM        | Finite-Elemente-Methode   |
| FTP        | File Transfer Protocol  |
| $G_i$      | Geometrie-Masterpunkt an Position $i$                           |
| KB         | Kaltband  |
| KOS        | Koordinatensystem   |
| OEE        | Overall Equipment Effectiveness                                 |
| $R_j$      | Referenz-Masterpunkt an Position $j$                            |
| RPS        | Referenz-Punkt-System   |
| Trigger    | Sensorsignal zur Steuerung der Geometriemessung                 |
| WLAN       | Wireless Local Area Network                                     |



## 1 Einleitung

Das Presswerk liefert Struktur- und Außenhautteile an Karosseriebau und Montage und trägt somit Verantwortung für die Qualität dieser Pressteile. Aufgrund von unregelmäßigen Schwankungen im Produktionsprozess dieser Bauteile können Fehler bezüglich deren Oberfläche, Form und Geometrie auftreten. Werden diese Fehler innerhalb der presswerksinternen Qualitätskontrollen nicht erkannt, verursachen sie später hohe Korrekturkosten. Rissbeschädigte Pressteile, welche erst in der Montage erkannt werden, müssen mit hohem Aufwand ausgetauscht werden. Außerdem müssen alle Pressteile derselben Abpressung einer aufwändigen Nachkontrolle unterzogen werden.

Die Qualitätskontrolle im Presswerk erfolgt heute durch eine optische und haptische Inspektion am Auslaufband der Presse durch geschultes Fachpersonal. Die Güte dieser Qualitätsprüfung ist abhängig von der Ausbringungsleistung der Presse, der täglichen Verfassung der Fachkräfte und der Art der auftretenden Fehler. Während Risse verhältnismäßig leicht erkannt werden, können Einschnürungen kaum und geometrische Abweichungen praktisch nicht im verfügbaren Zeitfenster erkannt werden. Eine Prüfung der Bauteilgeometrie erfolgt durch optische 3D-Messsysteme oder Koordinatenmessmaschinen, jedoch nur stichprobenartig z.B. für ein Teil pro Abpressung.

Geometrische Abweichungen am Pressteil wirken sich negativ auf den nachfolgenden Fügeprozess im Karosseriebau aus. Zwar werden diese Fehler durch die dortige Inline-Messtechnik erkannt, allerdings verringern die Korrekturmaßnahmen die Stabilität des Produktionsprozesses und führen dadurch zu Kosten und Mehraufwand. Während im Karosseriebau der Einsatz von Inline-Messtechnik zum Stand der Technik zählt, konnte ein solches System bis heute nicht in den Presswerksbetrieb integriert werden. Gründe dafür sind die hohen Hubzahlen der Presse und das daraus resultierende kurze Zeitfenster zur Messung und Datenverarbeitung, sowie die raue Presswerks Umgebung. Die Serientauglichkeit eines solchen Systems erfordert Beständigkeit gegenüber Schmutz und Erschütterungen. Es muss einfach gewartet werden können und darf den Produktionsprozess nicht behindern.

In den letzten 20 Jahren wurden zahlreiche akademische Arbeiten zur Überwachung des Umformprozesses durch den Einsatz von Sensoren untersucht. Der Fokus dieser grundlegenden Forschungsarbeiten lag jedoch nie in der Entwicklung eines presswerkstauglichen Messkonzeptes. Diese Arbeit versucht, ein solches System über eine andere Herangehensweise zu etablieren. Nicht im Labor und anhand einfacher Versuchsbauteile, sondern direkt im Presswerk und an realen, komplexen Karosseriebauteilen soll ein erfolgreiches Messsystem etabliert wer-

den. Dadurch wird dessen Eignung sowohl hinsichtlich Robustheit als auch der Relevanz der Messdaten sichergestellt. Ein wesentlicher Ansatz zur Erreichung dieses Ziels ist die Nutzung von Nachfolgewerkzeugen als Infrastruktur für Sensoren. Diese Werkzeuge bieten mehr Platz zur Integration. Ebenso sind diese einfacher zugänglich und wartungsfreundlicher.

Kern dieser Arbeit ist also die Entwicklung neuer Messkonzepte in Nachfolgewerkzeugen. Diese erfassen sowohl Informationen über den Einlaufweg in inneren Bauteilbereichen als auch die Bauteilgeometrie an ausgewählten Punkten. Dazu wird der aktuelle Stand der Technik mit Blick auf die manuelle und automatische Qualitätsprüfung im Presswerk in Kapitel 2 erläutert. Ausgehend von diesem Stand werden das Ziel und die Vorgehensweise dieser Arbeit zur Entwicklung presswerkstauglicher Messkonzepte beschrieben. Startpunkt dieser Entwicklung ist die Auswahl und Analyse eines realen Karosseriebauteils und der Ableitung von qualitätsrelevanten Messpunkten in Kapitel 4. Diese „Masterpunkte“ definieren die Anforderungen zur Entwicklung neuer Messkonzepte, welche in Kapitel 5 erläutert werden. Nach der Umsetzung folgt die Validierung dieser Systeme im Serienprozess. Abschließend wird gezeigt, wie die entwickelten Messkonzepte erfolgreich zur Verbesserung des Produktionsprozesses im Presswerk eingesetzt werden können.

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Herstellung von Karosserieteilen

#### 2.1.1 Karosserieherstellungsprozess

Der Herstellungsprozess von Karosseriebauteilen lässt sich in vorgeschaltete, planende Prozesse sowie den tatsächlichen, materiellen Herstellungsprozess nach Abbildung 2.1 unterteilen.

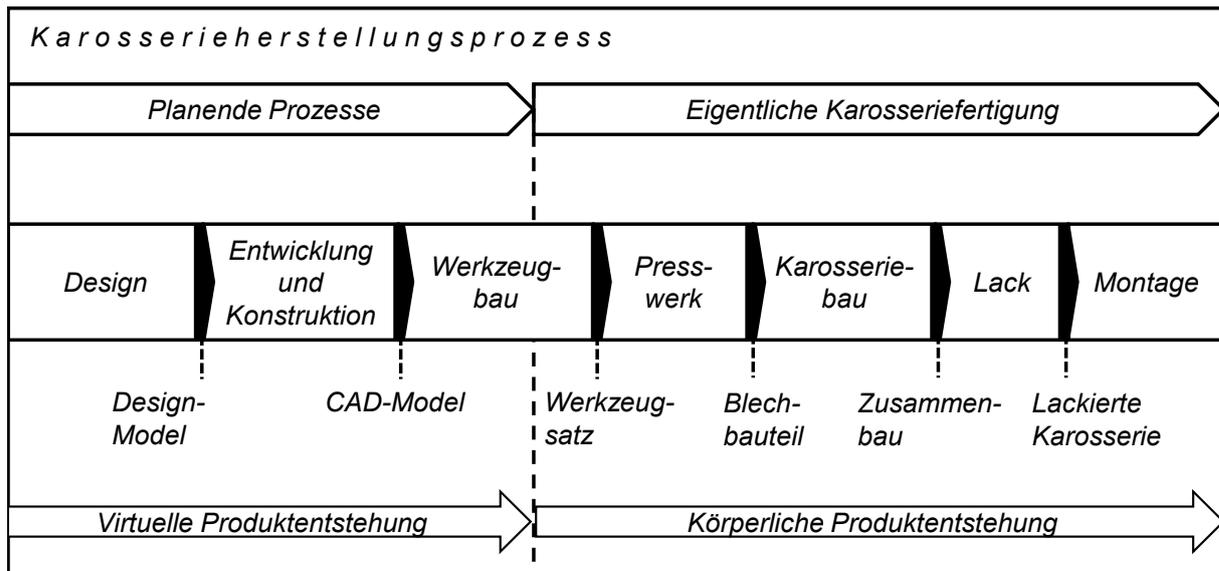


Abbildung 2.1: Einteilung des Karosserieherstellungsprozesses in planende und tatsächliche Herstellungsprozesse nach Birkert et al. (2013)

Lange vor der eigentlichen Produktion bestimmen Designentscheidungen die Geometrie zukünftiger Blechbauteile. Modelle des Fahrzeugs aus dieser Phase bilden die Grundlage für die Entwicklung und Konstruktion der Karosserie. Ergebnis der Konstruktionsphase sind die CAD-Dateien der Karosseriekomponenten. Über die Bauteilgeometrie wird die Methode, also die Reihenfolge und Art der Herstellungsschritte eines Blechbauteils, im Werkzeugbau festgelegt. Komplexe Blechbauteile, wie z.B. Seitenrahmen, werden nicht in einem einzigen Werkzeug gefertigt, sondern benötigen typischerweise 5 bis 6 Arbeitsfolgen (AFO). Simulationen dienen zur Überprüfung der umformtechnischen Herstellbarkeit des Bauteils, sowie der Ableitung von Werkzeugflächen. Nach der Konstruktion werden die Werkzeuge im Werkzeugbau gefertigt und eingearbeitet. Somit bildet der Werkzeugbau das Bindeglied zwischen planerischer und materieller Karosseriefertigung. Ziel der Einarbeitung ist es, Werkzeuge an das Presswerk zu übergeben, welche die Karosseriekomponenten in geforderter Qualität produzieren können.

Die materielle Fertigung von Karosserieteilen beginnt mit der Herstellung einzelner, umgeformter Blechteile im Presswerk. Diese werden im nachgeschalteten Karosseriebau durch Fü-

geprozesse zur Karosserie verbunden und anschließend in der Lackiererei beschichtet. In der Montage werden diese Komponenten der lackierten Karosserie zum Gesamtfahrzeug verbaut. Die Produktion von Blechteilen im Presswerk beginnt mit der Anlieferung des Blechwerkstoffes in Form von aufgewickelten Blechbändern, sogenannten Coils. Für jeden Werkstoff gibt es technische Lieferbedingungen hinsichtlich Materialeigenschaften und Schmierstoff, welche vom Materiallieferanten eingehalten werden müssen. Die Einhaltung dieser Lieferbedingungen ist eine wesentliche Voraussetzung für die Produktion fehlerfreier Blechbauteile. Innerhalb von Beschneidanlagen wird das Coil abgewickelt, Formplatinen geschnitten und gestapelt. Jedes Coil besitzt zur Identifikation eine eigene Kaltbandnummer. Je nach Werkstoff und Bauteil befinden sich 200 bis 1000 Platinen auf einem Stapel. Zum Fertigungstermin werden die entsprechenden Stapel vom Platinenlager zur Produktionspresse transportiert. Die Deckplatine jedes Stapels wird aufgrund möglicher Beschädigungen und Verunreinigungen vor dem Laden der Platinen entsorgt. Das Entstapeln der Platinen erfolgt automatisiert durch Roboter, welche mittels Saugnapfen sowie spezieller Vereinzelungstechniken wie Druckluft oder Magneten arbeiten. Nach der Vereinzelung durchläuft jede Platine die im Werkzeugbau festgelegten AFO bis zum fertigen Blechbauteil. Nach dem Platinenbeschnitt (AFO10) folgt die eigentliche Umformung (AFO15) im ersten Werkzeug des Pressensystems. Die benötigten Werkzeugsätze stehen entweder nahe der Presse in presswerksinternen Werkzeuglagern bereit oder werden zum Fertigungstermin von externen Lagern angeliefert. Während der Produktion werden die Fertigteile in angepasste Behälter gestapelt und abtransportiert. Je nach Fahrzeugderivat werden die Bauteile zum angrenzenden Karosseriebau gebracht oder zu anderen Standorten verschickt. Abbildung 2.2 verdeutlicht den Materialfluss im Presswerk vom angelieferten Coil zum fertigen Bauteil.

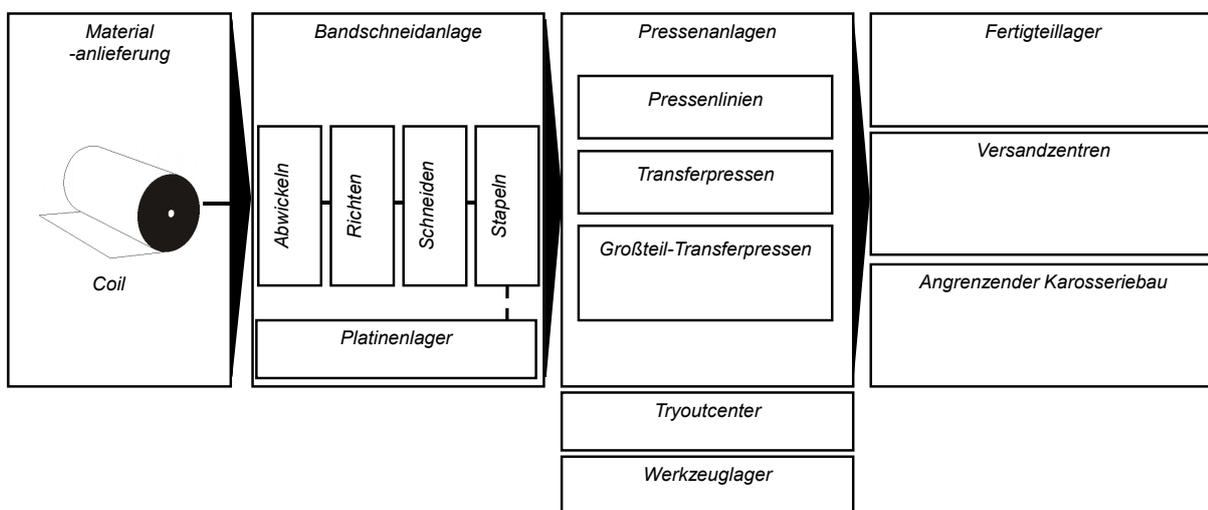


Abbildung 2.2: Wesentliche Komponenten eines Presswerks, geordnet nach dem Materialfluss vom Coil zum fertigen Bauteil, angelehnt an Schuler (1996)

---

Mit den nachfolgenden Kapiteln wird die Herstellung von Karosserieteilen in Pressenanlagen, ausgehend vom Verfahrensprozess hin zu den verschiedenen Pressensystemen und Einflussgrößen, umfassend erläutert.

### 2.1.2 Tief- und Streckziehen

In der Norm **DIN 8580** werden die Fertigungsverfahren in sechs Hauptgruppen eingeteilt: Urformen, Umformen, Trennen, Fügen, Stoffeigenschaften ändern und Beschichten. Umformen wird nach DIN 8580 definiert als Fertigen durch bildsames bzw. plastisches Ändern der Form eines festen Körpers unter Beibehaltung seiner Masse und seines Stoffzusammenhangs. Eine Abgrenzung zum Verformen besteht in der Tatsache, dass beim Umformen die resultierende Geometrie gezielt hergestellt wird und sich nicht zufällig, z.B. infolge eines Crashes, ergibt. (DIN 8580, 2003)

Durch DIN 8582 erfolgt eine Unterteilung der Umformverfahren nach der vorherrschenden Hauptbeanspruchung: Druck-, Zugdruck-, Zug-, Biege- oder Schubumformen (DIN 8582, 2003). Die für die Herstellung von Karosserieteilen bedeutendsten Verfahren sind Tiefziehen und Streckziehen (Schuler, 1996).

**Tiefziehen** zählt zu den Verfahren des Zugdruckumformens. Per Definition bleibt die Blechdicke des Bauteils während der Umformung konstant aufgrund der Kombination tangentialer Druck- und radialer Zugspannungen. Entsprechend Abbildung 2.3 werden für das Tiefziehen die Werkzeugkomponenten Stempel, Blechhalter und Matrize benötigt. Die Blechhalterkraft  $F_{BH}$  muss dabei so klein eingestellt werden, dass Material im Flansch nachfließen kann. Eine zu hohe Blechhalterkraft verhindert das Nachfließen des Materials. Somit muss ein größerer Anteil der Umformung aus der Materialdehnung folgen. Wird das Formänderungsvermögen des Werkstoffes erreicht, kommt es zur Einschnürungs- und Rissbildung. Ebenso führen tangentiale Druckspannungen zur Faltenbildung im Flansch, wenn die Blechhalterkraft zu klein eingestellt ist und dadurch zuviel Material einläuft. Zur Bewertung der Umformbarkeit eines Werkstoffes durch das Tiefziehen wird häufig das Grenzziehverhältnis  $\beta$  herangezogen. Dieses berechnet sich aus dem Verhältnis von größtmöglich verarbeitbarem Rondendurchmesser  $D_0$  zum Stempeldurchmesser  $d_0$ . (Doege und Behrens, 2010)(Siegert, 2015)

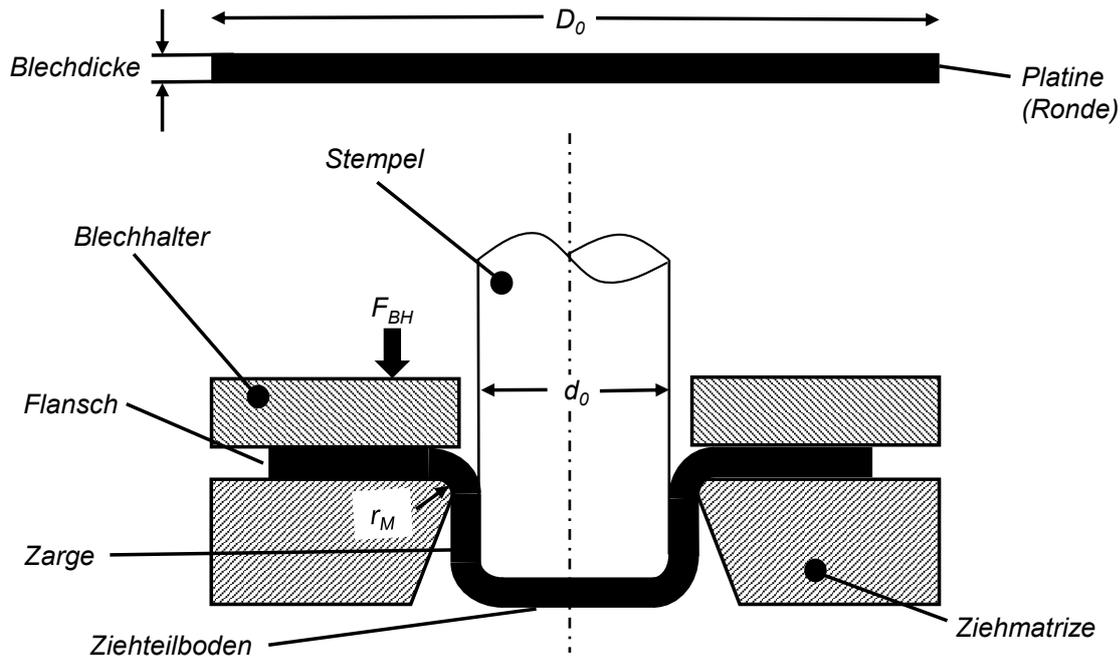


Abbildung 2.3: Tiefziehen eines Napfes mit den Werkzeugkomponenten Blechhalter, Ziehmatrize und Stempel nach Doege und Behrens (2010)

Beim **Streckziehen**, welches zu den Zugumformverfahren zählt, wird der Blechwerkstoff im Gegensatz zum Tiefziehen am Nachfließen in die Matrize gehindert. Diese ebene Zugbeanspruchung führt zur Abnahme der Blechdicke im Bauteil, der sogenannten Ausdünnung. Komplexe Karosseriebauteile, wie Türinnenbleche, werden durch ein kombiniertes Tief- und Streckziehen hergestellt. Dies geschieht durch eine lokale Beeinflussung des Materialflusses mittels Ziehstücken. Gerade großflächige Außenhautbauteile, wie etwa Dach oder Frontklappe, müssen während des Umformens streckgezogen („ausgestreckt“) werden um eine hohe Formstabilität des Blechbauteils zu erreichen. (Schuler, 1996)(Birkert et al., 2013)

Beim idealen Tiefziehen mit konstanter Blechdicke gilt für ein betrachtetes Volumenelement unter Berücksichtigung der plastischen Volumenkonstanz:

$$\varphi_1 = -\varphi_2 \quad (\text{Gl. 2.1})$$

mit der Hauptformänderung  $\varphi_1$  und der Nebenformänderung  $\varphi_2$ . Beim idealen Streckziehen ergibt sich für eine gleichmäßige, ebene Zugbeanspruchung die Beziehung:

$$\varphi_1 = \varphi_2 \quad (\text{Gl. 2.2})$$

Mittels **Formänderungsanalysen** kann in der Praxis für jeden Bereich eines Karosseriebauteils analysiert werden, welche Deformation dieser erfahren hat. Dafür werden kreisförmige oder rechteckige Raster auf die Blechplatte mittels Laser oder Ätzverfahren aufgebracht. Nach der Umformung wird die Verformung des Rasters mittels Kamerasystemen automatisiert erfasst. Aus der Veränderung der Kreise zu Ellipsen können die Haupt- und Nebenformänderung für jeden Punkt des Karosseriebauteils in einem Formänderungsdiagramm aufgetragen werden. Beispielhaft ist die Auswertung des Formänderungsdiagrammes für eine Seitenwand in Abbildung 2.4 aufgezeigt. Die Lage der Punktwolke in Bezug zu den idealen Kennlinien für Tief- und Streckziehen nach Gl. 2.1 und Gl. 2.2 gibt Auskunft über den Deformationszustand des Bauteils.

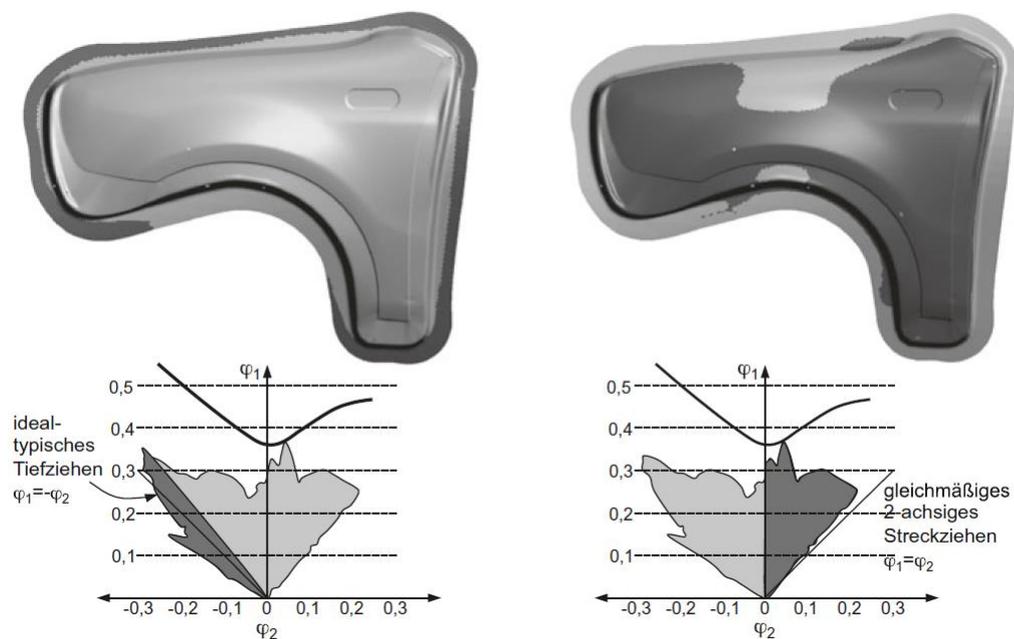


Abbildung 2.4: Formänderungsdiagramm einer Seitenwand mit Kennlinien des idealen Tief- und Streckziehens (Birkert et al., 2013)

Mit der werkzeugtechnischen Umsetzung eines kombinierten Tief- und Streckziehprozesses beschäftigt sich das nächste Kapitel.

### 2.1.3 Werkzeugtechnik

Je nach Verfahren, Teilegröße und Stückzahl wird zwischen Einzelwerkzeugen, Stufenwerkzeugen und Folgewerkzeugen unterschieden (Schuler, 1996). Großflächige Blechteile werden fast ausschließlich über Einzelwerkzeuge hergestellt. Je nach Komplexität des zu fertigenden Bauteils wird ein Satz aus vier bis sechs Einzelwerkzeugen benötigt. Die Umformung des Bauteils

erfolgt in Ziehwerkzeugen, während nachfolgende Werkzeuge Scherschneid- und Nachformoperationen ausführen. (Faaß, 2009)

Im Wesentlichen besteht ein Ziehwerkzeug aus den Komponenten Matrize, Blechhalter und Stempel. Wird die Blechhalterkraft nicht durch die Presse, sondern durch Federelemente im Werkzeug oder mittels Zusatzeinrichtungen aufgebracht, spricht man von einfachwirkenden Ziehwerkzeugen.

**Einfachwirkende Ziehwerkzeuge**, schematisch in Abbildung 2.5 skizziert, haben sich zur Herstellung automobiler Karosserieteile bewährt. Der Werkzeugaufbau ermöglicht die Weiterverarbeitung des Ziehteils, ohne dieses durch aufwändige Vorrichtungen wenden zu müssen. Ferner besteht die Gefahr der Oberflächenbeschädigung beim Wenden von Außenhautbauteilen. Beim einfachwirkenden Ziehen werden Stempel und Blechhalter auf dem Pressentisch montiert. Über Druckbolzen am Blechhalter wird die Blechhalterkraft durch eine Zusatzeinrichtung, dem Ziehkissen, aufgebracht. Dieses befindet sich unterhalb des Pressentisches. Die Matrize ist mit dem Pressenstößel verbunden.

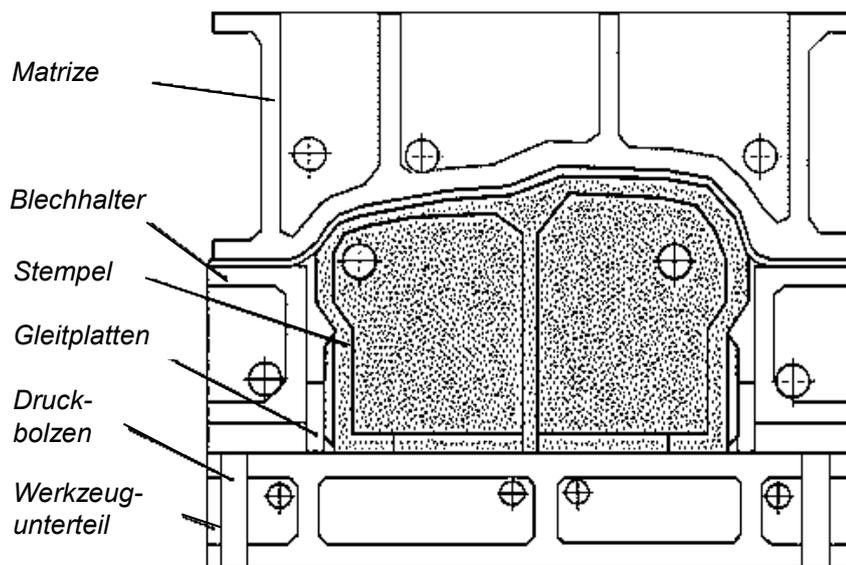


Abbildung 2.5: Aufbau eines einfachwirkenden Ziehwerkzeuges (Schuler, 1996)

Der **Ziehvorgang** kann entsprechend Abbildung 2.6 in vier Schritte unterteilt werden. Zuerst erfolgt das Einlegen der Platine durch die Transporteinrichtung (Feeder) während das Werkzeug geöffnet ist. Die Platine liegt nun auf dem Blechhalter auf. Im zweiten Schritt wird das Werkzeug geschlossen. Durch die Stößelbewegung der Presse wird die Matrize auf den Blechhalter gedrückt und die Ziehsicken der Platine werden ausgeprägt. Mit Erreichen der Blechhalterkraft verschiebt sich der Blechhalter nach unten. Dieser ist durch Gleitplatten im Unterteil geführt.

Der starr montierte Stempel formt konvexe Bereiche des Bauteils aus, während konkave Bereiche durch die Matrize geformt werden (Faaß, 2009). Nach der Umformung öffnet sich das Werkzeug und das Ziehteil kann durch einen Transportfeeder zum nachfolgenden Werkzeug befördert werden.

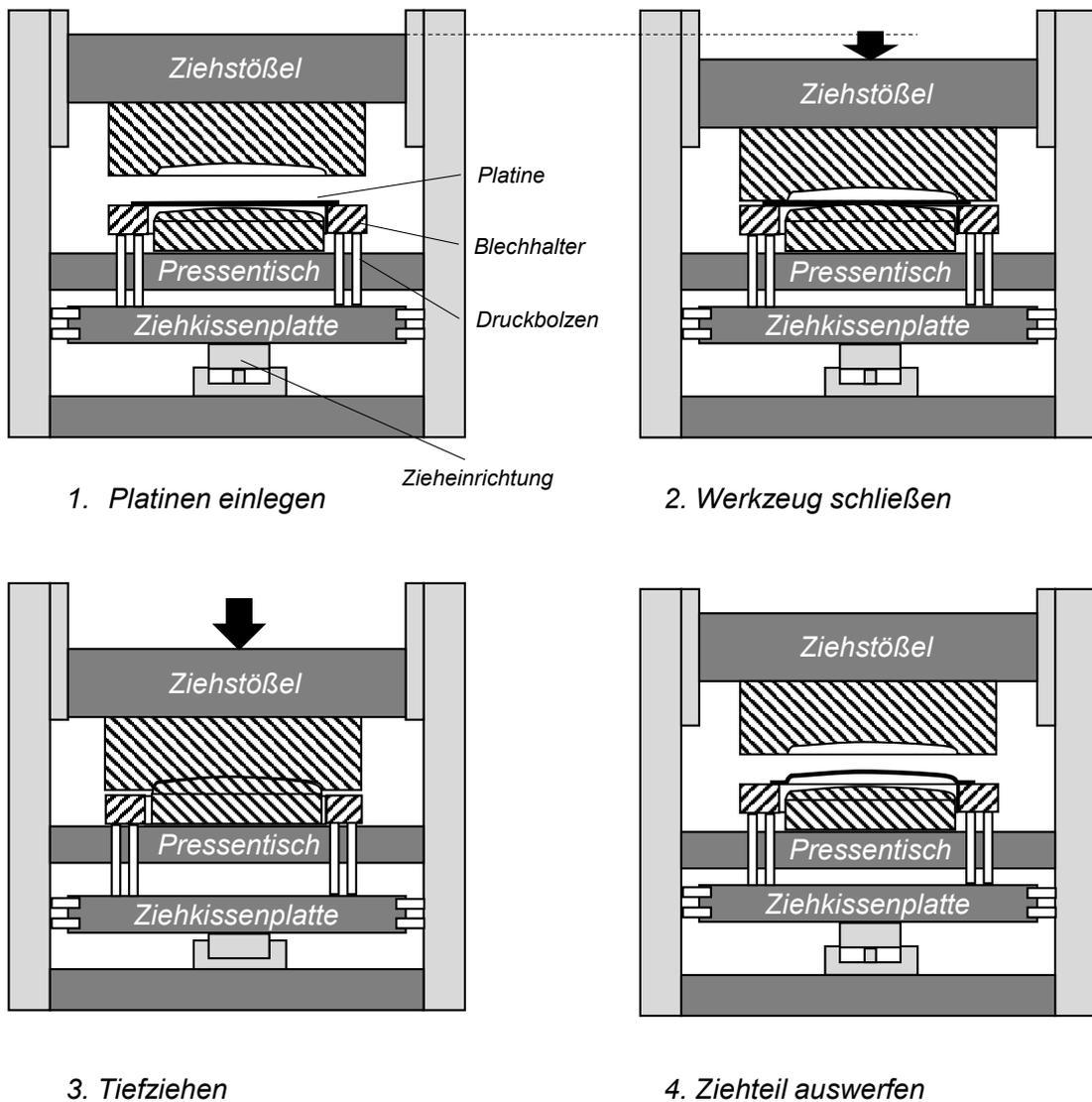


Abbildung 2.6: Schematischer Ablauf des einfachwirkenden Ziehvorganges nach Doege und Behrens (2010)

**Nachfolgewerkzeuge** führen Schneid- oder Nachformoperationen aus. Da bei nachfolgenden Bearbeitungsschritten kein Materialfluss mehr erfolgen soll, werden Niederhalter anstelle von Blechhaltern eingesetzt. Anhand des schematischen Aufbaus eines Schneidwerkzeuges aus Abbildung 2.7 soll der Schneidvorgang erläutert werden. Nach Einlegen des umgeformten Bauteils auf den Aufsatz des Unterteils wird das Werkzeug geschlossen. Der Niederhalter ist in

vertikaler Richtung beweglich im Werkzeugoberteil gelagert, während Schneidsegmente und Schneidstempel durch Konsolen fest mit dem Oberteil verbunden sind. Vor dem ersten Kontakt der Schneidelemente muss der Niederhalter aufsetzen und die Niederhalterkraft aufgebracht werden. Diese wird durch Gasdruckfedern im Werkzeugoberteil erzeugt. Umgekehrt bleibt der Niederhalter beim Rückhub der Presse solange aufgesetzt, bis alle Schneidelemente aus dem Bauteil gefahren wurden.

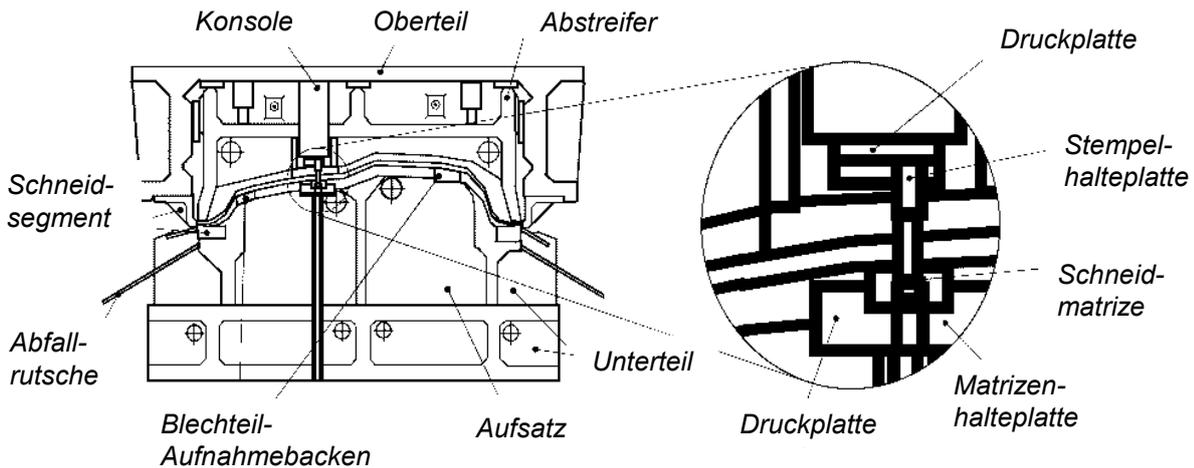


Abbildung 2.7: Aufbau eines Nachfolgewerkzeuges mit Beschnitt- und Lochoperationen (Schuler, 1996)

Das nächste Kapitel beschäftigt sich mit der Anlagentechnik, um die Hubbewegung des Werkzeugoberteils realisieren zu können.

#### 2.1.4 Pressensysteme

In Abhängigkeit der maßgeblichen Kenngröße eines Pressensystems wird zwischen weggebundenen, kraftgebundenen und arbeitsgebundenen Pressen unterschieden.

Zu den **arbeitsgebundenen Umformmaschinen** zählen Spindelpressen und Schabottenhämmer. Die im Bären des Hammers gespeicherte potentielle Energie ergibt sich aus dessen Masse und Fallhöhe. Sie ist maßgeblich für die im Umformvorgang zur Verfügung stehende Nutzarbeit. Typische Einsatzgebiete sind Schmiedeprozesse der Massivumformung. (Doege und Behrens, 2010)

Bei **kraftgebundenen Tiefziehpressen** wird die Stößelbewegung über einen Hydraulikkreislauf realisiert. Hydraulikzylinder führen die translatorische Stößelbewegung aus, indem sie die von Pumpen zur Verfügung gestellte hydraulische Leistung in mechanische Leistung umwandeln. Namensgebend für diese Pressensysteme ist die während des gesamten Umformvorgangs

gewährleistete Nennkraft. Über Regelungsventile besteht außerdem die Möglichkeit, die Stößelkinematik flexibel an Umformprozesse anzupassen. Für die Herstellung von Karosserieteilen im Presswerk werden mehrere hydraulische Einzelpressenstufen zu einer Pressenstraße hintereinandergeschaltet. Ebenso werden sie im Tryout-Center als Einarbeitungspressen genutzt. (Doege und Behrens, 2010)(Schuler, 1996)(Lange, 1990)

**Weggebundene Pressen** wandeln die rotatorische Bewegung eines Schwungrads über ein mechanisches Getriebe in die translatorische Bewegung des Stößels um. Über einen Antriebsmotor wird dem Schwungrad kontinuierlich Energie zugeführt. Periodisch auftretende Lastspitzen werden über die im Schwungrad gespeicherte Energie abgedeckt (Schuler, 1996). Die Bewegung des Stößels ist an die Art des eingesetzten Getriebes gebunden. Im Vergleich zu hydraulischen Pressen realisieren mechanische Pressen höhere Hubzahlen. Da die Nennkraft nicht über dem gesamten Stößelweg verfügbar ist, finden mechanische Pressen vorwiegend bei der Fertigung flacher Ziehteile und zur Durchführung von Schneidoperationen Einsatz (Doege und Behrens, 2010). Die Vorteile von kraft- und weggebundenen Pressen werden durch die neue Servopressentechnologie vereint. Jede Pressenstufe wird durch einen frei programmierbaren Servomotor angetrieben. Aktuell werden für die Serienproduktion im Presswerk vorwiegend mechanische Pressen sowie Servopressen eingesetzt.

Analog zur Werkzeugtechnik wird weiterhin zwischen einfach- und doppeltwirkenden Pressen unterschieden. Doppeltwirkende Pressen besitzen neben einem angetriebenen Ziehstößel auch einen Blechhalterstößel. Deswegen müssen die Bauteile nach dem Ziehvorgang häufig für weitere Arbeitsschritte gewendet werden. Bei einfachwirkenden Tiefziehpressen wird die Umform- und Blechhalterkraft vom Stößel aufgebracht. Die Teile liegen nach dem Ziehvorgang in einer günstigeren Lage für nachfolgende Operationen. In der Serienproduktion automobiler Presswerke werden deshalb ausschließlich einfachwirkende Pressen eingesetzt. (Schuler, 1996)

### 2.1.5 Einflussgrößen

Faaß (2009) unterteilt die Prozesseinflussgrößen in die drei Bereiche Platine, Werkzeug und Maschine, entsprechend Abbildung 2.8. Die Eigenschaften, der aus den Coils geschnittenen **Blechplatinen**, werden durch ihre geometrischen Abmessungen und mechanischen Eigenschaften beschrieben. Aus Zugversuchen werden die Streckgrenze  $R_{p0,2}$ , die Zugfestigkeit  $R_m$ , der Verfestigungsexponent  $n$ , die Bruchdehnung  $A_{80}$  sowie die Gleichmaßdehnung  $A_g$  und Anisotropiekennwerte  $r$  stichprobenartig ermittelt. Einige Forschungsarbeiten beschäftigten sich mit der kontinuierlichen, zerstörungsfreien Prüfung dieser Kennwerte in Coilanlagen mittels Wirbelstrom-Messtechnik (Heingärtner et al., 2013)(Faaß, 2009). Held et al. (2009) untersuch-

ten die mechanischen Kennwerte an neun Positionen eines Coils des Werkstoffes DP600 durch Zugprüfungen. Es ergab sich ein Anstieg der Zugfestigkeit und Streckgrenze vom Coilanfang zum ende hin, während  $r$ - und  $n$ -Werte abnahmen. Eine Erklärung dafür ist die eingebrachte Vorverfestigung durch die Wicklung des Coils, welche direkt im Coilauge am größten ist. Das tribologische System wird durch die Schmierstoffart und -menge, gemessen in  $\frac{g}{m^2}$ , und die Oberflächenstruktur der Platine beschrieben (Meiler, 2005). Bei der Schmierstoffart wird zwischen flüssigen Korrosionsschutzölen oder Prelubs und sogenannten trockenen Hotmelts unterschieden (Petsch, 2006). Werden Platinenstapel mit flüssigen Schmierstoffen zu lange gelagert, kann eine Umverteilung des Schmierstoffes eintreten (Mohr et al., 2000). Zur Kontrolle der Schmiermittelverteilung existieren deshalb bereits Systeme in Platinenschneidanlagen. Alternativ dazu können Blechdicke, Materialkennwerte, Schmierfilmdicke und Rauigkeit nach dem Abstapeln der Platinen an der Presse automatisch aufgenommen werden (Mork, 2011). Somit wurden verschiedene Möglichkeiten zur Überwachung der Coileigenschaften untersucht. Prinzipiell zeigen diese Arbeiten kontinuierliche Verläufe der Kenngrößen über die Länge eines Kaltbandes. Ausnahmen hierfür treten beispielsweise bei Stahlcoils auf, welche Schweißnähte enthalten (Neumann, 2013).

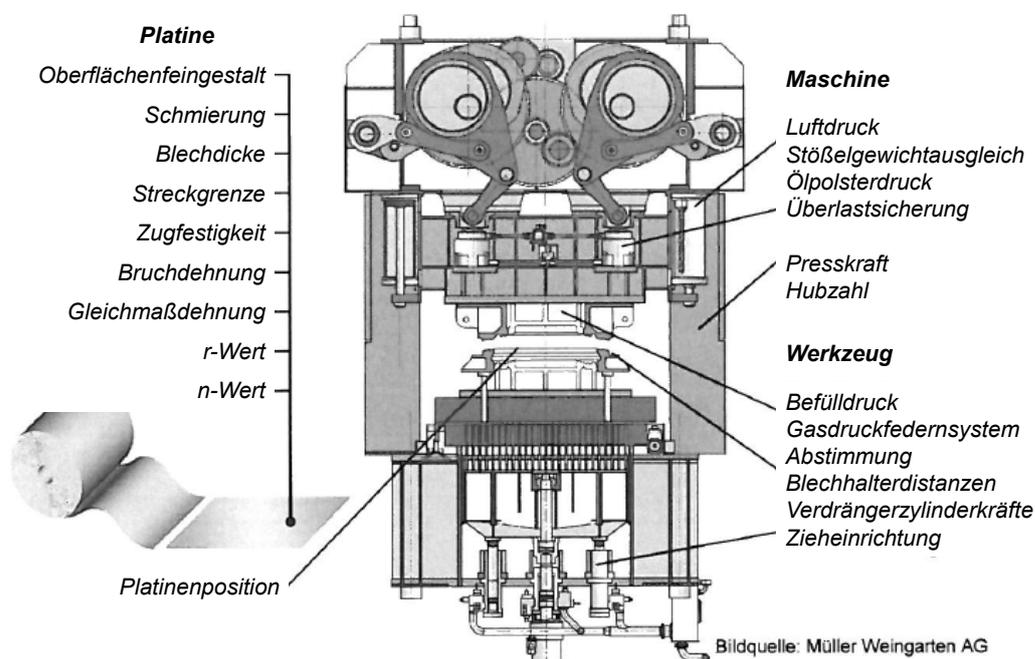


Abbildung 2.8: Einflussgrößen auf den Umformprozess (Faaß, 2009)

Während der Einarbeit von **Ziehwerkzeugen** werden dessen wesentliche Einflussgrößen auf die resultierende Bauteilqualität definiert. Durch die Wahl der Ziehstückenform und ihrer Radien wird die lokale Rückhaltekraft eingestellt. Typische Geometrieformen sind Rund- und

---

Rechteck-Ziehsicken (Ostermann, 2015). Die Sickenradien sollten im Presswerksbetrieb nur noch im Notfall abgeändert werden. Häufiger wird dort die Höhe der Blechhalterdistanzen und damit das lokale Tragbild des Blechhalters verändert. Zu den Einflussgrößen des Werkzeuges im Serienbetrieb zählt auch dessen Temperatur, welche im Verlauf einer Abpressung zunimmt und Einfluss auf das tribologische System nimmt. Auch die Platinenposition kann im Rahmen der Grobeinweiser-Toleranzen im Ziehwerkzeug variieren.

Zu den wichtigsten **Maschineneinstellungen** im Serienbetrieb zählen die eingestellte Hubzahl pro Minute sowie die Verdrängerzylinderkräfte des Ziehkissens. Je nach Bauart der Presse existieren Ziehkissen mit unterschiedlicher Anzahl an Verdrängerzylindern. Über die Maschinensteuerung können die jeweiligen Kräfte unabhängig voneinander verändert werden. Insbesondere die gezielte Beeinflussung des Platineneinlaufes durch diese Blechhalterkräfte im Zusammenspiel mit tragenden Distanzen ist anspruchsvoll.

Alle Einflussgrößen wirken sich auf den Platineneinlauf beim Umformen aus. Die tribologischen Eigenschaften der Platine, die eingestellten Blechhalterkräfte und das lokale Tragbild des Blechhalters entscheiden über die lokalen Rückhaltekräfte der Platine im Flanschbereich. Diese lokalen Rückhaltekräfte zwischen Bauteil und Werkzeug stehen mit den im Bauteil vorherrschenden Spannungen während der Umformung im Gleichgewicht. Diese werden durch die mechanischen Eigenschaften der Platine bestimmt. Veränderte mechanische Eigenschaften infolge von Chargenschwankungen führen beispielsweise zu anderen lokalen Dehnungen und Materialverschiebungen am Bauteil. Neben der Werkzeugtemperatur und dem Werkzeugverschleiß sind es im Wesentlichen die unregelmäßigen Schwankungen im Verlauf der Platineneigenschaften, welche negative Auswirkungen auf die Bauteilqualität ausüben. Mit den vorhandenen Maschinen- und Werkzeugstellgrößen müssen diese Schwankungen rechtzeitig, während des Produktionsprozesses, korrigiert werden. Dafür erforderlich ist eine effiziente Überwachung der Bauteilqualität, welche eine schnelle Reaktion durch Maschineneinsteller ermöglicht.

## 2.2 Qualitätsprüfung im Presswerk

### 2.2.1 Einteilung der Qualitätsfehler

Bei der Herstellung von Karosseriebauteilen werden die Qualitätsfehler eingeteilt in:

- Maßhaltigkeitsfehler,
- Oberflächenfehler sowie
- Herstellbarkeitsfehler.

### 2.2.2 Maßabweichungen

Die unregelmäßige Rückfederung nach dem Umformen ist nach der Einarbeitung des Ziehwerkzeuges die wesentliche Ursache für die auftretenden Maßabweichungen am Einzelteil. Am Ende der Umformung, wenn das Werkzeug geschlossen ist, stehen die im Ziehteil herrschenden Spannungen mit den äußeren Kräften im Gleichgewicht. Nach dem Öffnen des Werkzeuges und dem Wegfall der äußeren Kräfte verändert sich die Bauteilgeometrie infolge der Rückfederung, bis sich die inneren Spannungen in einem Gleichgewichtszustand befinden. Beth (1993) zeigte, dass die Rückfederung abnimmt, wenn überlagerte Zug- bzw. Zargenspannungen ansteigen. Dies kann durch eine Erhöhung der Reibkraft zwischen Blechhalter, Matrize und Ziehteilflansch erzielt werden. So führt eine Erhöhung der Blechhalterkraft zu einer geringeren Rückfederung des Bauteils. Die Einflussgrößen des Umformprozesses wirken sich auf die Größe der auftretenden Rückfederung aus (Bohn, 1998). Vor allem Schwankungen der Platineneigenschaften führen somit zur Veränderung der Bauteilgeometrie. Während durch die Nachstellung von Fügeprozessen im Karosseriebau die Nennmaßabweichung der Einzelteile kompensiert werden kann, können diese materialbedingten Schwankungen der Bauteilgeometrie nicht immer kompensiert werden. Wichtiger als die absolute Maßhaltigkeit der Bauteile, ist daher die Prozessbeherrschung im Presswerk. Robuste Prozesse weisen nur kleine Sprünge im Verlauf der Bauteilqualität und eine geringe Streuung auf. (Meinhardt et al., 2002)

Das sogenannte Referenz-Punkt-System (RPS) bildet in diesem Zusammenhang ein durchgängiges Konzept zur Aufnahme und Analyse von Karosseriebauteilen und -baugruppen hinsichtlich ihrer Maßabweichung von der Sollgeometrie. Die Referenzpunkte stellen jene Punkte dar, an denen das Bauteil im Karosseriebau während des Fügeprozesses fixiert wird. Um die Auswirkung von Maßabweichungen auf den Fügeprozess bereits im Presswerk feststellen zu können, werden spezielle Messaufnahmen entsprechend dieses RPS für jedes Bauteil gefertigt (Birkert et al., 2013)(Endres, 2012). Für die Auslegung solcher Messaufnahmen wird die 3-2-1-Regel angewandt (DIN 5459, 1982)(Bohn, 1998). Die 3-2-1-Regel gibt vor, wie die 6 Freiheitsgrade eines Bauteils im Raum gesperrt werden sollen, ohne das Bauteil zu verspannen. Außerdem sollen die Bauteile so im Raum positioniert werden, wie sie am späteren Fahrzeug entsprechend dem Fahrzeugkoordinatensystem positioniert werden. Eine Ausrichtung des Bauteils in Einbaulage spielt speziell für labile Bauteile eine wichtige Rolle, da diese eine deutliche elastische Deformation durch die Schwerkraft erfahren (Bohn, 1998)(Leuschel, 2010).

Für die tatsächliche, messtechnische Erfassung von Maßabweichungen stehen taktile Koordinatenmessmaschinen sowie optische Messsysteme zur Auswahl. Taktile Messanlagen prüfen lediglich vorgegebene Messpunkte eines Bauteils ab, welche für nachfolgende Prozessschritte

relevant sind. Dabei wird für jeden Messpunkt dessen Position im Raum zur Sollposition des CAD-Bauteils überprüft. Das CAD-Bauteil wird dabei virtuell, entsprechend RPS, im Raum positioniert. Eine Kontrollmessung erfolgt durch die Messung der Referenzpunkte (Keferstein und Marxer, 2015). Optische Messsysteme arbeiten nach dem Prinzip der Streifenlichtprojektion. Über die Falschfarben-Darstellung ihrer Messergebnisse wird ein Gesamteindruck der Maßhaltigkeit eines Bauteils vermittelt. Speziell bei Werkzeugeinarbeiten und der Ableitung von Werkzeugkorrekturen hilft dies bei der räumlichen Vorstellung der Maßabweichungen.

Nach aktuellem Stand der Technik gibt es keine Möglichkeit die Maßhaltigkeit von Strukturbauteilen vollständig, innerhalb des Produktionsprozesses zu überwachen. Für jedes Bauteil wird, je nach Einschätzung von Qualitätsspezialisten des Presswerks, ein Messintervall für die Stichprobenprüfung im Messraum festgelegt. So werden beispielsweise bei einer Abpressung von 4000 Bauteilen drei Bauteile kontrolliert. Diese Bauteile sollten möglichst zu unterschiedlichen Zeitpunkten aus der Produktion entnommen werden, um einen Überblick über die gesamte, produzierte Bauteilqualität zu erhalten.

Makroskopische Maßabweichungen bezüglich der Sollgeometrie des Bauteils sind für Außenhautbauteile aufgrund ihrer Labilität von untergeordneter Bedeutung. Außenhautbauteile müssen jedoch hohen optischen Ansprüchen genügen. Solche mikroskopischen Fehler bezüglich der Bauteiloberfläche werden im nächsten Kapitel behandelt.

### **2.2.3 Oberflächenfehler**

Je nach Bauteiltyp und -ort spielen Oberflächenfehler eine mehr oder weniger entscheidende Rolle für die Bauteilqualität. Außenhautbauteile und ihre Oberflächen, welche dem Kunden direkt ins Auge fallen, müssen spätestens nach der Lackierung ein makelloses Erscheinungsbild aufweisen. Strukturbauteile hingegen müssen keine optischen Ansprüche erfüllen. Jedoch können Oberflächenfehler innerhalb von Funktionsflächen, wie etwa Dichtflächen, Probleme verursachen.

Je nach Größe und Erscheinungsbild wird zwischen nachfolgenden Oberflächenfehlern unterschieden:

- Einfallstellen,
- Druckstellen,
- Welligkeiten und Unruhen sowie
- Anhau- und Nachlaufkanten.

Aktuell erfolgt die Überprüfung der Bauteiloberfläche durch die visuelle Kontrolle am Auslaufband der Presse. Außerdem wird eine Stundenteilprüfung durchgeführt. In regelmäßigen Abständen werden Bauteile ausgeschleust und deren Oberfläche mittels Ziehsteinen geschliffen. Mikroskopische Oberflächenfehler wie Einfallstellen werden dabei vom Abziehstein nicht erfasst. Die Oberfläche behält dort ihr mattes Erscheinungsbild bei und der Fehler kann dadurch leichter identifiziert werden. Neben der visuellen, subjektiven Beurteilung von Oberflächenfehlern existieren auch objektive, optische Oberflächenprüfungssysteme (Eichhorn, 2005).

Typischerweise treten Einfallstellen im Bereich der Türgriffmulde an der Türaußenhaut auf. Liegen Druckspannungen benachbart zu unverfestigten Bauteilbereichen, können diese Bereiche aufgrund der umliegenden Spannungen lokal zu Einfallstellen deformieren. Zur Vermeidung von Einfallstellen müssen diese gefährdeten Bereiche stärker ausgestreckt und dadurch verfestigt werden. Eine Unruhe ist in diesem Zusammenhang das lokale Auftreten mehrerer Einfallstellen, welche Gesamthaft als Welligkeit in Erscheinung tritt.

Druckstellen werden häufig durch Fremdkörper, wie Flitter, Haare oder Zinkabrieb, in den Werkzeugen verursacht. Diese drücken sich beim Schließen der Presse in die Bauteiloberfläche. Folglich wird dieses Fehlerbild durch die Reinigung der Werkzeuge behoben. Zwar ist die Fehlerbehebung von Druckstellen vergleichsweise einfach, führt aber im Laufe der Abpressungen aufgrund ihrer zyklischen Wiederholung zu erheblichen Stillstandszeiten.

Anhau- bzw. Nachlaufkanten entstehen beim ersten Kontakt zwischen Werkzeugradius und Platine und wandern während der Umformung mit der Materialbewegung. Mikroskopisch betrachtet handelt es sich um einen, wenige  $\mu\text{m}$  großen, Versatz des Blechquerschnitts, welcher optisch als Linie wahrgenommen wird. Diese ist je nach Ausprägung und Lage nach der Lackierung sichtbar. Viele Außenhautbauteile werden deshalb auf dem Stempel beschnitten, um mögliche sichtbare Anhaulanten am Fertigteil zu vermeiden. Innerhalb von Bauteilradien sind diese Kanten schwieriger wahrzunehmen und werden deshalb häufig akzeptiert. Ein beherrschter Umformprozess ist dabei entscheidend. Dadurch wird sichergestellt, dass die Anhaulanten nicht infolge der Materialbewegung außerhalb von Bauteilradien am Fertigteil auftreten. Prinzipiell steigt die Sichtbarkeit der Anhaulante mit zunehmender Abstreckung und Blechdicke. Dickere Bleche weisen an den äußeren Biegeradien höhere Dehnungen auf, diese verstärken den Effekt der Anhaulantenbildung. (Hahn, 2004)

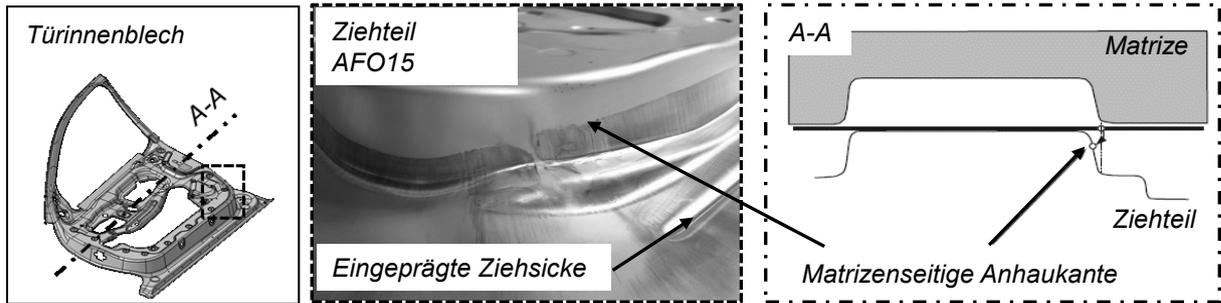


Abbildung 2.9: Matrizen-Anhaukante am Ziehteil eines Türinnenbleches

#### 2.2.4 Herstellbarkeitsprobleme

Im Gegensatz zu Maßhaltigkeits- und Oberflächenfehlern, welche nur im Zusammenspiel mit nachfolgenden Prozessschritten wie Fügen oder Lackieren sinnvoll bewertet werden können, sind Herstellbarkeitsprobleme eindeutig am Pressteil identifizierbar (Groche, Beiter et al., 2008). Sie vermindern die Festigkeit und Crashtauglichkeit des Karosserieteils, können nicht nachgearbeitet werden und sind deshalb stets zu vermeiden. Zu den Herstellbarkeitsfehlern zählen

- Reißen,
- Einschnürungen und
- Falten.

Beim Umformen treten Reißen auf, wenn die örtliche Deformation am Bauteil das Formänderungsvermögen des Werkstoffs überschreitet. Hauptursache für ihre Entstehung im Serienbetrieb sind die zwischen unterschiedlichen Materialchargen schwankenden Platineigenschaften während der Serienproduktion (Thamm, 1998). Diese Schwankungen beeinflussen den lokalen Materialfluss der Platine während der Umformung und verändern folglich die Deformation und Ausdünnung des Werkstoffs. Für duktile Werkstoffe treten Einschnürungen vor dem Reißen auf. Ähnlich der Einschnürung des Probenquerschnitts im Zugversuch tritt dieses Phänomen auch an umgeformten Karosserieteilen auf. Schwache, beginnende Einschnürungen zeichnen sich durch eine veränderte Oberflächengestalt ab und werden als Schatten am Fertigteil wahrgenommen. Ausgeprägte Einschnürungen weisen eine deutlich reduzierte, lokale Blechdicke auf. Für die visuelle Qualitätsprüfung am Auslaufband stellt die Erkennung von Einschnürungen deshalb eine Herausforderung dar.

Falten 1. Art entstehen im Flanschbereich des Bauteils aufgrund von tangentialen Druckspannungen beim Tiefziehen. Diese Druckspannungen steigen mit zunehmenden Materialfluss der

Platine. Anhand der Materialbewegung lässt sich somit ein Prozessfenster für den Umformprozess definieren, innerhalb dem riss- bzw. einschnürungs- und faltenfreie Bauteile produziert werden. Bei nicht-zylindrischen Ziehteilen können außerdem im Zargenbereich Falten auftreten, sogenannte Falten 2. Art. Während Falten 1. Art in der Praxis häufig im Abfallbereich des Bauteils auftreten, sind Falten 2. Art meist am Fertigbauteil sichtbar und somit qualitätsrelevant (Danzberg, 2001). (Lange, 1990)

## **2.3 Inline-Qualitätsprüfung und Prozessüberwachung**

### **2.3.1 Inline-Messtechnik im Presswerk**

Die klassische Qualitätsprüfung im Presswerk basiert auf der visuellen Prüfung der Bauteile durch Fachkräfte am Auslaufband der Presse und einer Stichprobenprüfung der Bauteilgeometrie durch Messanlagen. Werden Bauteilfehler, beispielsweise Reißen, in nachgeschalteten Prozessschritten der Karosserieherstellung identifiziert, besteht bislang keine Möglichkeit rückwirkende, quantitative Informationen über die produzierte Bauteilqualität im Presswerk abzufragen. Es besteht somit ein großes Ungleichgewicht zwischen der produzierten Menge an Bauteilen und den darüber vorhandenen Qualitätsinformationen. Da unklar ist, wie viele Bauteile möglicherweise das selbe Fehlerbild aufweisen, müssen sämtliche Bauteile der entsprechenden Abpressung nachkontrolliert werden.

Um ein Gleichgewicht zwischen Informations- und Produktionsumfang zu schaffen, sollte das bisherige Prüfkonzept durch neue, presswerkstaugliche Inline-Messsysteme erweitert werden. Diese Systeme, bestehend aus Sensoren und Verrechnungseinheiten, sind innerhalb der Fertigungslinie integriert und ermöglichen eine Generierung von Bauteildaten im Produktionstakt. Eine Echtzeitvisualisierung der aufgenommenen Prozessinformationen für die Produktionsmitarbeiter stellt einen weit größeren Vorteil, als nur die rückwirkende Datenauswertung dar. Aktuelle Prozessänderungen werden unmittelbar sichtbar gemacht und können effizient korrigiert werden. Der Fehlerschlupf wird reduziert, wodurch Fehlerkosten in Nachfolgeprozessen vermieden werden. Insgesamt wird der Produktionsprozess stabiler (Schmitt und Damm, 2008). Durch die Nutzung von Inline-Messtechnik in Kombination mit Qualitätsregelkreisen ist eine Steigerung der Qualitätsrate und die damit verbundene Steigerung der Gesamtanlageneffektivität (OEE) möglich (Fleischer et al., 2014)(Schmitt, 2006). Ebenso ermöglichen diese Messdaten die automatisierte Steuerung von Produktionsanlagen.

Die Untersuchung von Inline-Messkonzepten für die Umformtechnik ist bereits seit über 20 Jahren Gegenstand zahlreicher akademischer Arbeiten. Im heutigen Presswerksbetrieb konnte bisher keine dieser Entwicklungen in größerem Umfang etabliert werden. Ursache dafür sind die

---

hohen Anforderungen an solche Systeme für den Presswerksbetrieb. Zum einen darf die Messtechnik die Produktion nicht einschränken, sondern muss diese sinnvoll ergänzen mit robusten, flexiblen Messkonzepten (Weber, 2014)(Munde, 2015). Zum anderen existieren bisher keine Richtlinien oder Planungsanweisungen zur erfolgreichen Integration von Sensorik in Umformwerkzeugen. Schwierig gestaltet sich außerdem die Wirtschaftlichkeitsabschätzung zur Finanzierung solcher Inlinesysteme, da der Nutzen im Vorfeld nicht exakt kalkuliert werden kann. Aufgrund der rauen Presswerks Umgebung werden im Idealfall neben der eigentlichen Messaufgabe absichernde Referenzmessungen für jedes Bauteil durchgeführt. Die Systemfähigkeit wird dadurch fortlaufend überprüft. Zusammenfassend ergeben sich nachfolgende Anforderungen für eine erfolgreiche Umsetzung von Inline-Messtechnik im Presswerk:

- **Flexibilität:** Pressenunabhängige, vollautomatische Messsysteme.
- **Einfachheit:** Leicht zu integrieren, wartungsfreundlich, robust und kostengünstig.
- **Redundanz:** Selbstüberwachende Funktionen.
- **Relevante Daten:** Erfassung ausgewählter, interpretierbarer Daten.

Speziell die Erfassung sinnvoller Messdaten aus dem Umformprozess ist umfassend untersucht worden. Die nachfolgenden Kapitel fassen diese Arbeiten, gegliedert nach den zu erkennenden Qualitätsmerkmalen, zusammen.

### 2.3.2 Geometriemessung

Je nach der Komplexität der Fertigteilegeometrie existieren unterschiedliche Ansätze zur Inline-Geometriemessung. Für einfache Biegebauteile kann die Fertigteilegeometrie durch die Bestimmung des Rückfederungswinkels gemessen werden (Abdullah et al., 2012). Dies geschieht beispielsweise durch CCD-Kameras innerhalb von Stanzwerkzeugen, welche ein Bild von jedem Teil aufnehmen und mittels Bildverarbeitungssoftware auswerten (Krinninger et al., 2016).

Karosseriebauteile werden hingegen anhand zahlreicher Messpunkte und deren Abweichung von der Sollgeometrie, entsprechend der Ausrichtung im RPS, bewertet. Bislang wird die Inline-Geometrieprüfung im Automobilbau nur in den Nachfolgeprozessen (Karosseriebau und Montage) flächendeckend eingesetzt. Bewährt hat sich dort der Einsatz laseroptischer Triangulationssensoren, welche durch Roboter geführt werden (Krengel-Rothensee et al., 2006). Während im Karosseriebau stabile Zusammenbauten in vergleichsweise einfacher Umgebung gemessen werden, gibt es bis heute kein solches System im Presswerk. Sowohl die hohe Anzahl an Messpunkten, als auch die exakte Ausrichtung des Bauteils erschweren die Umsetzung eines direkt

vergleichbaren, vollständigen Inline-Messsystems im Presswerk erheblich. Vielmehr wird dort aktuell der Ansatz verfolgt, wenige, relevante Messpunkte und deren relative Abweichung im Prozess zu erfassen.

So untersuchten Hamedon et al. (2014) die Einsetzbarkeit kleiner, endoskopartiger Sensorkameras zur Messung der Rückfederung von abgestellten Flanschen. Diese Kameras erfassen den Abstand des abgestellten Flansches zur Werkzeugfläche vor und nach der Rückfederung und berechnen ihre Differenz. Schwierig gestaltet sich die Übertragung dieses Messprinzips zur Bewertung komplexerer Geometrien, wie beispielsweise die Krümmung einer Frontklappe. An den erforderlichen Messpunkten kann im Werkzeug von außen kein Abstand zwischen Werkzeug und Bauteilfläche durch Kameras gemessen werden. Zur Kontrolle solcher Bauteile wurden Abstandssensoren in einer Bauteilzwischenablage montiert (Stöhr und Traidl, 2014). Jedes produzierte Bauteil wird für einen Pressenhub auf dieser Ablage durch den Feeder positioniert. Die Abstandssensoren nehmen in dieser Zeit einen Abstandswert auf. Prozessbedingte Änderungen der Bauteilgeometrie führen zur Änderung dieser Abstandswerte. Die absolute Bauteilgeometrie kann im Vergleich zur Offlinemessung nicht direkt gemessen werden. Jedoch kann für jeden Abstandssensor ein Wertefenster definiert werden, in dem i.O. Bauteile produziert werden. Nachteilig ist, dass eine Leerstation mit Zwischenablage für dieses Messprinzip erfordert wird. Komplexe Bauteile benötigen für ihre AFO alle Pressenstufen. Somit steht keine Leerstufe zur Verfügung. Die Einsetzbarkeit mehrerer CCD-Kameras, welche auf Basis der Streifenlichtprojektion die vollständige Bauteilgeometrie erfassen, wurde von Weikmann (2010) exemplarisch an einem Rechtecknapf überprüft. Vorgeschlagen wird die Integration solcher Kameras am Auslaufband der Presse. Eine am Auslaufband befindliche Geometrie-Messstation für Folgeverbundbauteile wird außerdem durch Relard (2015) beschrieben.

### **2.3.3 Riss- und Faltenprüfung**

Prinzipiell können die Methoden der Risserkennung in direkte und indirekte Erkennungsverfahren eingeteilt werden. Direkte Risserkennungssysteme liefern ein binäres Antwortsignal, beispielsweise ein Spannungssignal von 24 V, wenn ein Riss detektiert wird. Indirekte Methoden basieren auf dem Vergleich von Prozessgrößenverläufen jedes produzierten Bauteils mit einer Sollkurve.

Verschiedene Sensortechniken wurden für die direkte Detektion von Rissen in Pressteilen untersucht. So können durch geeignete Positionierung von Zeilenkameras risskritische Bereiche eines Bauteils überwacht werden. Beispielsweise wird dies zur Erfassung des Zeitpunktes der Rissbildung beim freien Biegen eingesetzt (Kaupper und Merklein, 2013). Entscheidend bei

diesen bildverarbeitenden Systemen sind die Auswertelgorithmen zur Erkennung der Risse im aufgenommenen Bild. Offene, vollständig ausgebildete Risse können außerdem durch eine Durchstrahlprüfung erkannt werden (Adam et al., 1997). Diese Systeme bestehen aus einer Lichtquelle und einem Empfänger. Dringt Licht durch die Rissöffnung, wird dieses vom Empfänger erkannt und ein entsprechendes Signal wird ausgegeben. Wichtig ist die exakte Platzierung dieser Sensoren in den risskritischen Bereichen des Bauteils.

Beispielhaft kann über eine Schallemissionsanalyse eine Detektion von offenen und geschlossenen Rissen am gesamten Bauteil realisiert werden (Haupt, 2003)(Straube, 1993)(Yoo et al., 2016). Thermografische Verfahren beruhen auf der Annahme, dass sich beim Auftreten von Qualitätsfehlern andere Oberflächentemperaturen am Bauteil einstellen als bei einem Gutteil. Am Beispiel eines Türinnenbleches zeigte Thamm (1998), dass gerissene Bauteile lokal eine in der Größenordnung von 10 bis 20 K erhöhte Temperatur nach der Umformung aufweisen. Letztlich bietet die Thermografie eine Möglichkeit zur indirekten Analyse des chargenabhängigen Reibverhaltens. Ebenso können durch die Überwachung der Umformkraft Aussagen über die Bauteilqualität getroffen werden (Siegert et al., 1990). Blaich (2012) entwickelte ein neuartiges Konzept zur indirekten Messung von Zargenspannungen durch die Integration von Kraftmessdübeln im Werkzeug. Über den Verlauf der Zargenspannung über der Ziehtiefe kann eine Aussage über lokal auftretende Reißer oder Falten 2. Art (Zargenspannungen zur Vorhersage von Zargenfalten) am Bauteil gemacht werden. Die Definition zuverlässiger Sollkurven und Prozessgrenzen stellt für diese Erkennungsverfahren eine Herausforderung dar. Ein vielversprechender Ansatz zur indirekten Risserkennung ist die Messung des Stoffflusses.

#### **2.3.4 Stoffflussmessung**

Grundgedanke bei der Stoffflussmessung in Umformprozessen ist es, eine einzige Messgröße zu erfassen, welche sensitiv auf alle Prozess-Einflussgrößen reagiert. Dies wird durch die Messung der lokalen Materialverschiebungen im Ziehteil ermöglicht. Während Falten am Bauteil tendenziell bei zu hohem Materialeinlauf entstehen, führt ein geringer Materialeinlauf zu höherer Abstreckung und Rissgefahr. Somit existiert ein Prozessfenster hinsichtlich des lokalen Einlaufweges, innerhalb dessen fehlerfreie Bauteile produziert werden können. (Neumann, 2013)

Nachfolgend aufgeführt sind mögliche Ursachen für Schwankungen im Stofffluss (Birkert et al., 2013):

- Pressenwechsel,
- Chargenwechsel des Halbzeuges,
- Prozesstemperatur,
- Wechsel des Bauteilwerkstoffes,
- Werkzeugänderungen und
- Schwankung der Beölungsmenge und Oberflächenstruktur.

Prinzipiell müssen zwei Vorgehensweisen bei der Stoffflussmessung unterschieden werden. Werden nur die Verschiebung der Materialpunkte am Ziehteilrand betrachtet, so ist dies eine globale, integrale Betrachtung des Stoffflusses. Während der Werkzeugeinarbeit wird so mittels Augenmaß ein einfacher, qualitativer Abgleich des Soll- und Ist-Flanscheinzuges durchgeführt. In Bereichen mit hohen Umformgraden reicht die Betrachtung dieses Flanscheinzuges nicht aus, um eine gesicherte Aussage über die Qualität zu treffen. Die Messorte sollten dort an Bereichen gewählt werden, an denen die eigentliche Umformung stattfindet, um die großen, lokalen Dehnungen zu berücksichtigen (Griesbach, 2000)(Bräunlich, 2002). Des Weiteren spielt die Form des zu untersuchenden Bauteils eine wichtige Rolle. Bei Bauteilen mit hohem Streckziehanteil ist der Stofffluss weniger zur Prozessüberwachung geeignet. Die Größe des absoluten Materialeinlaufs ist für diese Bauteile verhältnismäßig klein und muss deshalb mit hoher Genauigkeit gemessen werden (Ziegler, 1999). Eine weitere Möglichkeit ist die Aufbringung von Mustern auf die Platine im Rahmen einer Formänderungsanalyse, welche zur vollständigen Analyse des plastischen Umformvorganges eingesetzt wird. Durch die Verschiebung und Deformation dieser Muster, meist Kreise oder Quadrate, können lokale Umformgrade berechnet werden. (Griesbach, 2000)

Erste Untersuchungen zur Inline-Messung des Stoffflusses handelten von der Messung des globalen Blecheinzuges mittels mechanisch-tastender Blechzungen, welche am Blechteilrand anliegen und der Platine beim Einlauf nachfolgen (Straube, 1994). Ruzovic (2000) verwendete zur diskreten Bestimmung der Blechkantenposition Näherungsschalter. Bei jedem Auslösen eines solchen Schalters wird außerdem die aktuelle Ziehtiefe gemessen und in Relation zur Soll-Ziehtiefe kann eine Aussage über den Stofffluss getroffen werden. Eine Weiterentwicklung der mechanischen Sensoren erfolgte durch den Einsatz von Rollkugelsensoren, welche

---

die Bewegung der Platine im Flanschbereich ähnlich der Funktion einer Kugelmaus am Computer aufnehmen (Griesbach, 2000). Straube (1994) und Neumann (2013) weisen darauf hin, dass der Einsatz von mechanischen Sensoren aufgrund von Verschleißerscheinungen nicht für den Serieneinsatz im Presswerk geeignet ist. Weitere Arbeiten beschäftigten sich daher mit der Entwicklung von berührungslosen Messkonzepten.

So nutzte Forstmann (2000) induktive Wegsensoren zur Messung des Platineneinlaufes. Das Magnetfeld der Sensorspule steht senkrecht zur einlaufenden Platine. Durch die Platinenbewegung ändert sich das Verhältnis zwischen Platinenüberdeckung und Luft. Über der damit einhergehenden Veränderung der Spulenimpedanz wird die Bewegung der Platine indirekt bestimmt. Neumann (2013) optimierte die von Forstmann vorgestellte Wirbelstromsensorik für den Serieneinsatz im Presswerk durch die Verwendung herkömmlicher Wirbelstrom-Abstandssensoren zur Einlaufwegmessung. Sie integrierte vier Wirbelstromsensoren im Blechhalter eines Ziehwerkzeuges zur Herstellung einer Heckklappe. Bräunlich (2002) weist darauf hin, dass dieses Sensorkonzept nur an faltenfreien Bereichen realisiert werden kann. Außerdem beschränkt sich der Einsatz der Sensorik auf den Flanschbereich des Bauteils (Neumann, 2013). Nur durch eine geschickte Positionierung der Wirbelstromsensoren kann der Einfluss des Platinenpositionierungsfehlers im Ziehwerkzeug herausgerechnet werden (Neumann et al., 2011). Ein sinnvoller Ersatz des mechanischen Sensors ist durch optische Lasersensoren gegeben, welche eine genaue Abstandsmessung über das Triangulationsprinzip ermöglichen (Bräunlich, 2002)(Munser et al., 2004). Mittels Lasersensoren wird die Lage der Platinenkante sowohl vor, als auch nach dem Umformprozess gemessen. Es besteht im Vergleich zum Wirbelstromprinzip daher kein Problem bezüglich der Positioniergenauigkeit der Platine, wenn auch Ungenauigkeiten infolge von Platinenverdrehungen nicht erkannt werden können. Rittmeier (2007) integrierte CMOS-Sensoren direkt in der Matrize eines Werkzeuges zur Herstellung von Radhausschalen. Ähnlich einer optischen PC-Maus konnten so Verschiebungen und Geschwindigkeiten am Ziehteilrand ermittelt werden. Wie jede Optik sind diese Lasersensoren schmutzempfindlich.

Annen (2012) beschäftigte sich mit der Eignung der Flanscheinzugsmessung zur Vorhersage der Bauteilqualität am Beispiel eines Lackfrosch-Werkzeuges. Er zeigte, dass eine exakte Vorhersage nahe der Versagengrenzen der Bauteile problematisch ist. Sowohl Gut- als auch Schlechteile mit gleichen Flansch-Messergebnissen traten dort auf. Ebenso hängt die Größe des Prozessfensters vom betrachteten Bauteilbereich ab. Desto kleiner das vorhandene Prozessfenster, umso höher muss die Genauigkeit der eingesetzten Messmethode sein. Mithilfe der Punkt-Methode konnte nachgewiesen werden, dass die Verschiebung innerer Materialpunkte eine schärfere Vorhersage der Bauteilqualität ermöglicht. Bei der Punkt-Methode müssen Markierungspunkte auf

die unverformte Platine aufgebracht werden. Während der Umformung wandern diese Punkte, ihre Endposition kann anschließend durch Sensorkameras in der TryOut-Pressen erfasst werden. Für zukünftige Entwicklungsarbeiten empfiehlt Annen, einen Fokus auf die Erfassung von Prozessinformationen und -fenster direkt im Serienprozess zu setzen.

Die Erfassung von prozessbeschreibenden Messgrößen, wie dem Platineneinlauf, ermöglicht den Aufbau intelligenter Regelungssysteme. Für die Regelung von Umformprozessen existieren diesbezüglich verschiedene Ansätze.

### 2.3.5 Geschlossener Regelkreis

Klassische, geschlossene Regelkreise dienen zur Führung von kontinuierlich gemessenen Regelgrößen durch die gezielte Anpassung geeigneter Stellgrößen. In Bezug auf den Umformprozess ist der Stofffluss eine solche Regelgröße, welche durch die beschriebenen Inline-Messverfahren für jedes Bauteil gemessen wird. Als Stellgrößen können Maschineneinstellungen, wie die Kraft der Verdrängerzylinder im Ziehkissen, die Hubzahl pro Minute, oder die Höhe der Ziehdistanzen im Werkzeug, dienen. Aktive Stellelemente können durch Antriebe oder Zylinder automatisiert verstellt werden. Es existieren sowohl Regelungskonzepte, welche die Stellgrößen nur zwischen den Hüben verändern, als auch während eines Hubes, um die Qualität des aktuellen Bauteils noch zu verbessern.

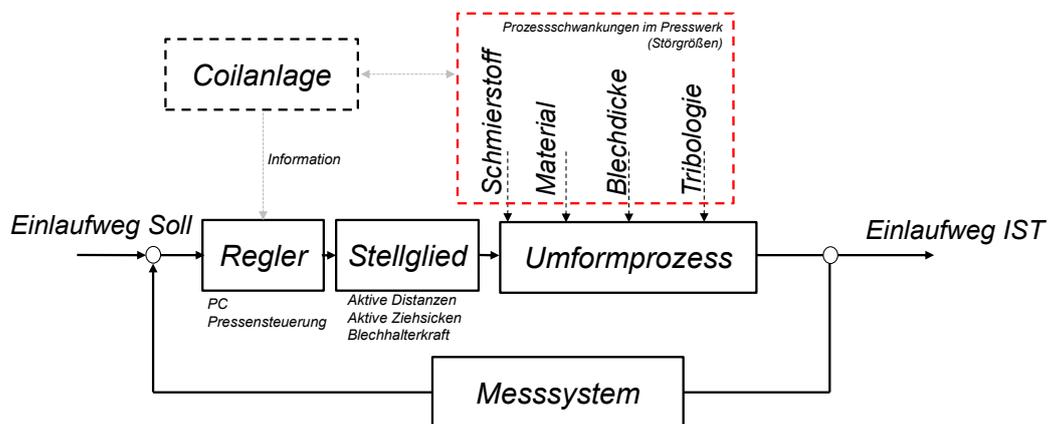


Abbildung 2.10: Schematischer Regelkreis zur Regelung des Einlaufweges beim Umformen

Rittmeier (2007) integrierte Druckzylinder in einen aktiven, segmentelastischen Blechhalter des Ziehwerkzeuges einer Radhausschale. Mit diesen Druckzylindern lässt sich die lokale Geometrie des Blechhalters und damit die Rückhalterkraft verändern. Diese Anpassung geschieht nicht während der Umformung, sondern stets für das darauffolgende Bauteil. Doege, Seidel et al.

(2002) unterscheiden in diesem Zusammenhang drei Arten von Blechhaltern. So kann zwischen starren, segmentierten und biegsamen Blechhaltern unterschieden werden. Anhand eines Rechtecknapfes wurde die Eignung dieser Blechhalterkonzepte zur Beeinflussung des Stoffflusses untersucht, wobei der Einsatz biegsamer Blechhalter empfohlen wird. Verstellt wurden für diese Untersuchung die Blechhalterkräfte im Ziehkissen mit passiven Blechhaltern.

Durch die Verwendung aktiver, automatisiert verstellbarer Distanzen konnte Faaß (2009) Reißen an einer B-Säule im Serienbetrieb verhindern. Dabei können die eingesetzten Distanzen so schnell verfahren, dass präzise Höhenänderungen zwischen den Hüben im laufenden Prozess möglich sind. Über Keiltriebe erfolgt die mechanische Verstellung der Distanzen, diese bieten die notwendige Robustheit für den Serienbetrieb.

Die Verstellung der Ziehstabhöhe während des Umformens mittels aktiver Ziehsicken wurde von Beck (2001) für U-förmige Bauteile in Kombination mit Zargenspannungs-Sensoren untersucht. Der Fokus lag auf der Reduzierung der Rückfederung dieser Profile. Li et al. (2000) untersuchte den Einfluss dieses Verfahrprofils hinsichtlich der maximal erreichbaren Ziehtiefe eines Aluminium-Bauteils.

Durch die Verstellung der Blechhalterkraft während eines Pressenhubes wurde der Umformprozess eines Rechtecknapfes von Kitayama et al. (2010) optimiert, gleichzeitig konnten die erforderlichen Umformenergien im Vergleich zur Umformung mit konstanter Blechhalterkraft deutlich reduziert werden. Gunnarsson und Schedin (2001) zeigte, wie dadurch die Rückfederung von Außenhautbauteilen reduziert werden kann. Barthau und Liewald (2016) regelten die gemessenen Zargenspannungen während des Umformens durch Änderungen der Blechhalterkraft in Kombination mit einem segmentelastischen Blechhalter.

### **2.3.6 Modellbasierte Regelung und Data-Mining**

Bei der modellbasierten Regelung werden die kontinuierlich gemessenen Einflussgrößen des Umformprozesses, im Wesentlichen die Platinen-Eigenschaften, mit der daraus resultierenden Bauteilqualität verknüpft und in einer Datenbank hinterlegt. Die daraus gewonnenen Informationen ermöglichen die Ableitung eines Prozessmodells für den Umformprozess und machen diesen regelbar. Beispielhaft umgesetzt wurde ein solches Regelungskonzept von Faaß (2009) und Mork (2011) für die Bauteile Seitenrahmen und Verstärkung B-Säule. Gemessen wurden Werkstoffkennwerte der Platinen mittels Wirbelstromprüfung sowie Werkzeug- und Bauteiltemperaturen. Risskritische Bereiche konnten so vorhergesagt und mittels aktiver Blechhalterdistanzen korrigiert werden.

Sowohl die Prüfung von mechanischen Werkstoffkennwert, als auch der Blechdicke, Oberflä-

chenbeschaffenheit und der Schmierfilmmenge wurden durch Purr et al. (2015) in eine Platinschneidanlage integriert. Sie dienen zur Befüllung eines Datenbanksystems. Mit den Methoden des Data-Minings, also der systematischen Anwendung statistischer Auswertungsmethoden, können so komplexe Zusammenhänge zwischen den Platinen-Eigenschaften und der Bauteilqualität hergestellt werden.

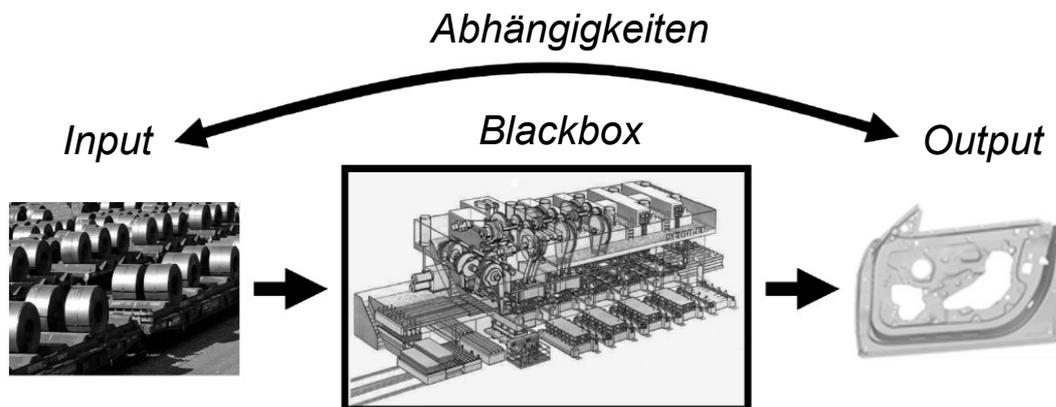


Abbildung 2.11: Verknüpfung von Input- und Outputgrößen zur Analyse ihrer Abhängigkeiten (Data-Mining)

Werden lediglich die Platinen-Daten aufgenommen und mit der Bauteilqualität verglichen, so wird der Weg der Platine zum Fertigteil als Blackbox behandelt. Die Vorgänge innerhalb dieser Blackbox, beispielsweise während des Umformens, werden nicht näher betrachtet. Jedoch kann jede Werkzeugänderung, beispielsweise die Anpassung lokaler Rückhaltekräfte im Werkzeug, zur Verfälschung des bis dahin aufgebauten Vorhersagemodells führen. Gerade neue Bauteile und deren Werkzeuge unterliegen zahlreichen Änderungen zu Beginn ihrer Serienproduktion. Das Potential des Data-Minings in dieser Phase ist also eingeschränkt.

## 2.4 Umformsimulation

Zur präventiven Qualitätssicherung zählt der Einsatz von FEM-Berechnungen in der Planung von Umformwerkzeugen (Hartung, 2001). Im industriellen Umfeld werden vorwiegend Basic-Simulationsmodelle eingesetzt. Analog zur Formänderungsanalyse werden die lokalen Dehnungszustände am virtuellen Fertigteil mit dem Formänderungsvermögen des verwendeten Werkstoffes verglichen. So können im Vorfeld riss- und faltenkritische Bauteilbereiche vorhergesagt und vermieden werden.

Mögliche Abhängigkeiten der Reibzahl oder des Materialmodells von der Temperatur, der Umformgeschwindigkeit oder des Druckes werden in diesen Basic-Modellen nicht berücksichtig-

sichtigt. Außerdem werden elastische Verformungen der Werkzeuge vernachlässigt (Neumann, 2013)(Grübeler, 2002). Neben diesen Restriktionen können die für den Serienbetrieb relevanten Schwankungen, vor allem der Platinen-Eigenschaften, und deren Wirkung auf das Prozessfenster nicht analysiert werden. Statistische FEM-Tools bieten heute umfangreichere Möglichkeiten zur Analyse der Prozessgrenzen von Umformprozessen. Sowohl für die Werkzeugeinarbeit, als auch den Serienbetrieb im Presswerk wurde das Potential dieser Softwaretools aufgezeigt (Annen, 2012)(Prexl, 2013). Sie werden aber aufgrund hoher Rechenzeiten nur in geringem Umfang eingesetzt. Die Rückführung relevanter Informationen aus den realen Umformprozessen ist aufwändig und wird nur für wenige Bauteile durchgeführt. Somit ist der Abgleich zwischen Simulation und Realität, speziell hinsichtlich der Vorhersage von Prozessfenstern, nicht effizient möglich. Ein kalkulierbarer Nutzen des Mehraufwandes für die Durchführung statistischer Umformsimulationen ist schwierig abschätzbar. Eine automatische Datengenerierung, beispielsweise durch Inline-Messtechnik, vereinfacht diesen Abgleich erheblich und könnte dadurch Ertüchtiger für die Nutzung dieser Tools werden.

## **2.5 Bildverarbeitung und Kantendetektion**

Die wesentlichen Komponenten eines industriellen Bildverarbeitungssystems sind Sensoren, Rechner sowie eine Schnittstelle zur Kommunikation und Ansteuerung. Als Sensoren werden häufig Flächenkameras eingesetzt. Bei intelligenten Kamerasystemen ist der Rechner direkt im Gehäuse der Kamera eingebracht. Somit führt die Kamera neben der Bildaufnahme auch die Bildverarbeitung durch. (Demant et al., 2011)

Die Bildaufnahme geschieht in drei Schritten, welche in Abbildung 2.12 zusammengefasst sind. Zuerst wird das auf die Sensorfläche einfallende Licht räumlich abgetastet. Die Sensorfläche besteht aus einzelnen, meist quadratischen, Sensorelementen, welche zueinander rechtwinklig und regelmäßig angeordnet sind. Die Anzahl dieser Bildelemente bestimmt die Auflösung des erzeugten Bildes. Im zweiten Schritt erfolgt die zeitliche Abtastung. Über die Belichtungszeit bei der Bildaufnahme wird festgelegt, wie lange die Sensorelemente durch das einfallende Licht elektrisch aufgeladen werden. Die Quantifizierung dieser Ladungswerte geschieht durch eine Analog-Digital-Wandlung. Entsprechend der Position des Sensorelements auf der Sensorfläche wird die zugehörige Position der Bildmatrix mit einem Grauwert befüllt. Gängig ist die Einteilung der Grauwerte von 0 (Weiß) bis 255 (Schwarz). (Burger und Burge, 2015)

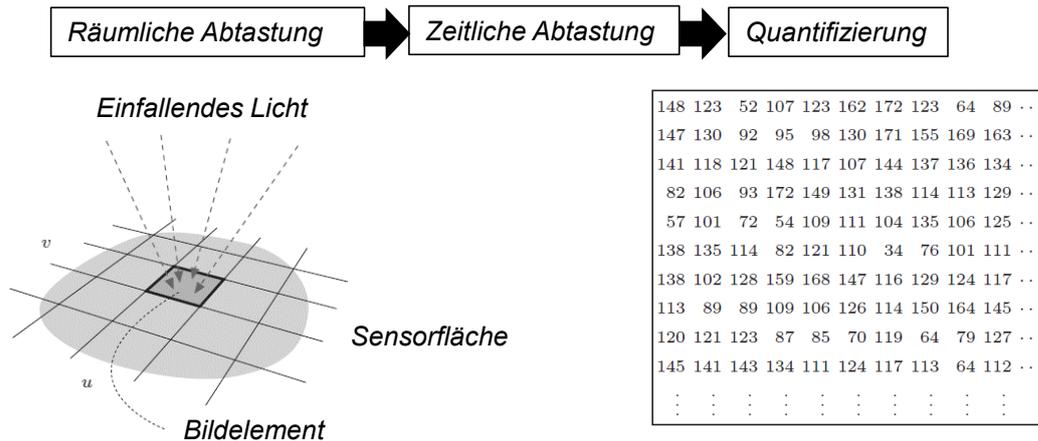


Abbildung 2.12: Schritte der Bildaufnahme bis zur digitalen Bildinformation nach Burger und Burge (2015)

Diese Grauwertmatrix ermöglicht die Anwendung mathematischer Algorithmen im Rahmen der Bildverarbeitung. Eine typische Aufgabe ist die Suche von Mustern oder Standardgeometrien wie Kantenübergängen oder Kreisen im Bild. Vorab ist die Lage und Ausrichtung der zu detektierenden Geometrie häufig bekannt, sodass der Suchbereich zugunsten der Rechenzeit eingegrenzt werden kann. Bei der gradientenbasierten Kantendetektion wird so die erste Ableitung des Grauwertes über eine vorgegebene Richtung berechnet. Eine Kante wird dann vom Bildverarbeitungssystem erkannt, wenn eine bestimmte Grauwertdifferenz („Kantenhöhe“) über eine vorgegebene Anzahl an Pixeln („Kantenlänge“) erreicht wird. Die Genauigkeit dieser Kantendetektion ist dabei nicht durch die Pixelgröße begrenzt. Entsprechend Abbildung 2.13 wird die Kantenposition subpixelgenau, über den Schnittpunkt der mittleren Grauwertdifferenz und dem Grauwertverlauf, berechnet. Genauigkeiten in der Größenordnung von  $1/5$  bis  $1/10$  Pixel sind dadurch im Feldeinsatz erreichbar. (Demant et al., 2011)

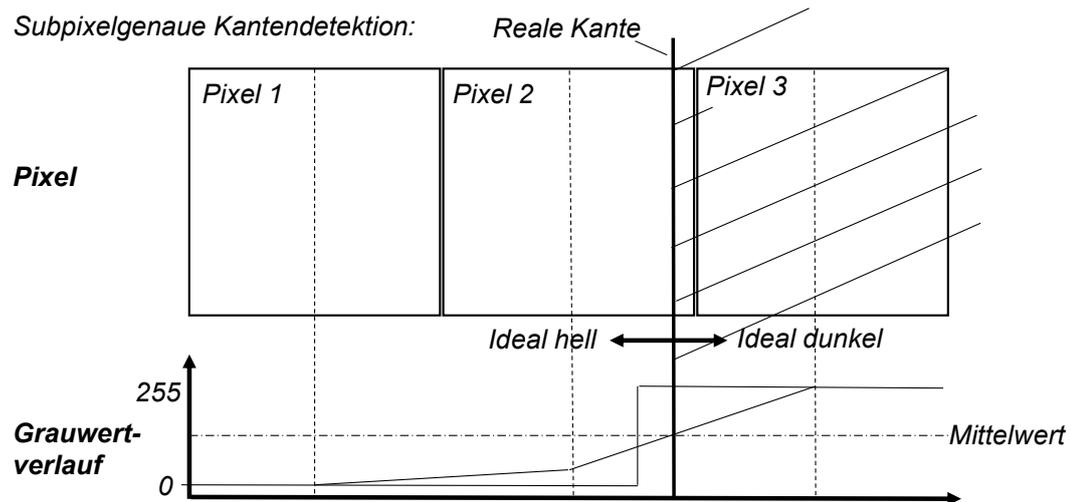


Abbildung 2.13: Funktionsweise der subpixelgenauen Kantendetektion

## 2.6 Fazit

Sowohl die Erfassung von Platinen-Eigenschaften als auch die Prozessregelung wurden umfassend untersucht. Problematisch ist aber die Aufnahme präziser Bauteil- bzw. Prozessdaten für komplexe Karosseriebauteile direkt im Serienprozess. Im akademischen Bereich wurden bis auf wenige Ausnahmen einfache Versuchsbauteile untersucht, für die eine Flanscheinzugsmessung zur Vorhersage der Bauteilqualität ausreicht. Im praktischen Presswerksbetrieb wird jedoch für solche einfachen Bauteile nicht der Aufwand betrieben, Messtechnik zu integrieren und Untersuchungen durchzuführen. Diese Bauteile können nach der Einarbeit ohnehin sehr stabil gefertigt werden. Vielmehr sind es die geometrisch und damit ziehtechnisch komplexen Bauteile, wie Seitenrahmen oder Türen und Klappen, bei denen Fehler in Geometrie oder Oberfläche auch lange nach der Einarbeitsphase hohen Korrekturaufwand verursachen. Damit eine Prozessregelung im Presswerk tatsächlichen Nutzen erbringt, müssen für diese Bauteiltypen funktionsfähige Sensorkonzepte entwickelt werden. Neben dem Platineneinlauf in ziehkritischen, inneren Bauteilbereichen gibt es bis heute auch zur Geometrieprüfung noch kein funktionierendes Inlinesystem. Bisher erfolgt die Prüfung der Maßhaltigkeit, bis auf wenige Ausnahmen, stichprobenartig. Um auch die produzierte Bauteilgeometrie durch Prozessregelungen zu beherrschen, müssen hierfür neue Inline-Messkonzepte entwickelt werden.



### **3 Vorgehensweise und Struktur der Arbeit**

#### **3.1 Zielsetzung**

Die zunehmende Anzahl an Fahrzeugderivaten beeinflusst die Produktionsplanung im Presswerk. Produktionszeiten je Werkzeugsatz werden kürzer. Folglich steigt die Anzahl an Werkzeugwechseln pro Tag und Pressenstraße. Außerdem werden alte Pressenlinien aktuell durch wenige, moderne Servopressenlinien ersetzt. Zukünftig erfolgen deshalb häufigere Bauteilverlagerungen zwischen verschiedenen Pressen, um die Kapazitätsplanung effizienter zu gestalten. Ein Weg zur Beherrschung dieser zunehmenden Anforderungen an die Flexibilität im Presswerk liegt in der Steigerung der Prozessrobustheit, etwa durch die Integration von Qualitätsprozessen direkt in den Herstellungsprozess der Bauteile (Hortig, 2014).

Im Kern verfolgt dieses Ziel auch die Industrierevolution 4.0, nämlich die Vernetzung von Produktionsprozessen. Dafür müssen sinnvolle Daten aus den Produktionsprozessen gewonnen werden (Digital Shadow), etwa mittels integrierter Sensorik. Wesentlicher Erfolgsfaktor dieses Entwicklungstrends im Presswerk sind robuste Sensorkonzepte, sowie deren Integration in bestehende Strukturen wie Pressenlinien, Toolings oder Werkzeuge (Groche, Schreiner et al., 2014). Ein weiterer Baustein liegt im Datenmanagement (Big Data). Wenige, interpretierbare Daten sollten für jedes produzierte Bauteil aufgezeichnet werden, um Datenmengen beherrschbaren Ausmaßes zu generieren.

Über die gesamte Prozesskette der Bauteilproduktion im Presswerk hinweg werden bereits sehr viele Daten aufgezeichnet und Simulationen durchgeführt. Beim Platinenschnitt wird die Ölmenge gemessen und hinterlegt. Teilweise werden Materialparameter mit Hilfe von Wirbelstrommessungen aufgezeichnet. Zudem sind in der Planungs- und Entwicklungsphase viele Machbarkeitsuntersuchungen für alle kritischen Bauteile durchgeführt worden, die eine virtuelle Abschätzung des realen Prozessfensters mit Hilfe von DoE-Methoden ermöglichen. Auch sind die Simulationstechniken in den letzten Jahren erheblich verbessert worden, so dass semi-automatische Sensitivitätsanalysen in der Einarbeitungsphase der Presswerkzeuge erfolgreich Anwendung finden. Die Effektivität von Qualitätsschleifen wird dadurch deutlich erhöht. Zur Unterstützung der Serienproduktion werden diese Tools aber bis heute nicht systematisch eingesetzt. Letztlich gibt es im Presswerksbetrieb noch kein effektiv nutzbares Messsystem mit dem der Platineneinlauf und das Deformationsverhalten an repräsentativen und sensitiven Stellen innerhalb komplexer Karosseriebauteile zuverlässig und kostengünstig gemessen werden können.

Zielsetzung dieser Arbeit ist deshalb die Entwicklung eines einfachen Messsystems, mit dem

das Einlauf- und Deformationsverhalten im Serienbetrieb hinreichend genau gemessen werden kann. Nachfolgende Grundsatzentscheidungen wurden für dieses System getroffen:

- **Werkzeugintegration:** Das System soll flexibel und pressenunabhängig einsetzbar sein. Toolings werden entsprechend der an der Presse verwendeten Transporteinrichtung gefertigt. Leerstationen können nur verwendet werden, wenn eine freie Pressenstufe an der Anlage vorhanden ist. Pressenunabhängig eingesetzt werden jedoch die Werkzeuge.
- **Masterpunkte:** Um ein effizientes Datenmanagement zu gewährleisten, werden mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen sogenannte Masterpunkte identifiziert. Diese ausgewählten, spezifischen Merkmale sollen für ein exemplarisches Serienbauteil mit dem System zuverlässig erfasst werden.
- **Serientauglichkeit:** Die im Stand der Technik vorgestellten Messsysteme wurden stets im Ziehwerkzeug integriert. Um der Serientauglichkeit im Presswerk Rechnung zu tragen, sollen in dieser Arbeit Nachfolgewerkzeuge als Infrastruktur dienen. Sie sind leichter zu warten und Sensoren können einfacher integriert werden.

### 3.2 Vorgehensweise

Die allgemeine Vorgehensweise zur Entwicklung dieses Systems ist in Abbildung 3.1 veranschaulicht. Im ersten Schritt wird ein qualitätskritisches Serienbauteil ausgewählt und dessen Herstellungsprozess analysiert. Ziel dieser Analyse ist die Identifikation von Masterpunkten für die Geometrie- und Einlaufwegmessung aus Simulationen und bestehenden Qualitätsprozessen. Mit der Information der Masterpunkte können neue Konzepte zur Qualitätsmessung in Nachfolgewerkzeugen erarbeitet werden. Zur Umsetzung eines Pilotsystems werden geeignete Sensoren ausgewählt und in das Serien-Nachfolgewerkzeug integriert. Im Anschluss an die Umsetzung, erfolgt die Validierung des Systems im regulären Serienbetrieb. Dafür werden Messgenauigkeiten ermittelt und die Funktionalität des Systems hinsichtlich der Erfassung des Produktionsprozesses bewertet. Die Wirksamkeit, der in dieser Arbeit vorgestellten Messkonzepte, wird durch die Steigerung der Bauteilqualität im exemplarischen Regelbetrieb nachgewiesen. Übertragbarkeitsstudien bestätigen die Einsetzbarkeit dieser Messkonzepte für verschiedene Bauteile. Zudem wird das Potential der Inline-Messtechnik für die Einarbeit von Presswerkzeugen im Werkzeugbau aufgezeigt.

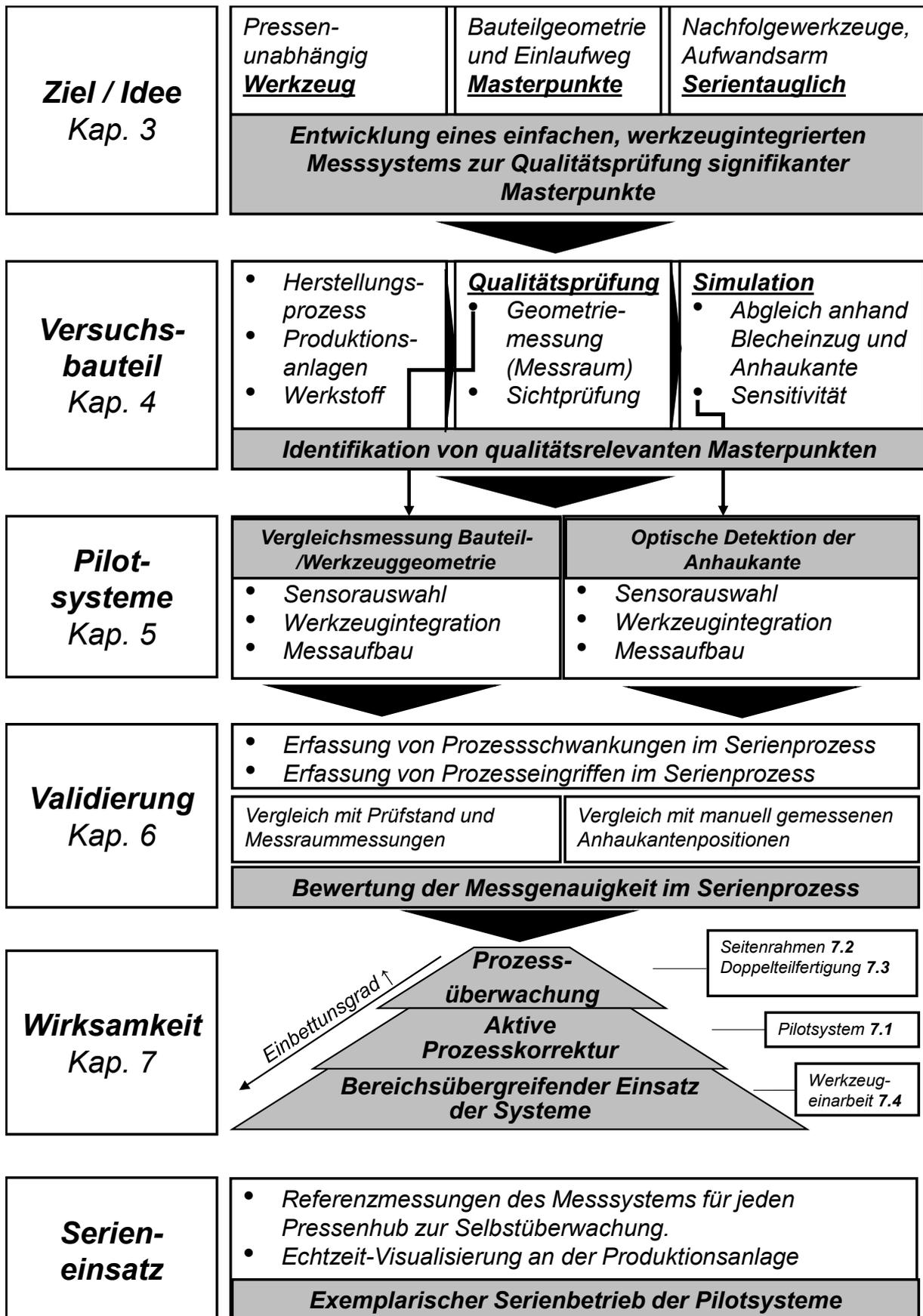


Abbildung 3.1: Vorgehensweise für die Erarbeitung neuer, werkzeugintegrierter Messkonzepte im Presswerk



## 4 Versuchsbauteil

Die Masterpunkte für die Inline-Messung sind für jeden Bauteiltyp spezifisch zu bestimmen. Folglich muss im ersten Schritt ein Versuchsbauteil ausgewählt werden. Dies geschieht auf Basis von Expertengesprächen und Kennzahlen aus dem Presswerksbetrieb. Für das gewählte Versuchsbauteil wird anschließend der Herstellungsprozess analysiert. Aus der Praxis bekannte, qualitätskritische Bauteilbereiche, sowie Umformsimulationen dienen als Entscheidungsgrundlage für die Wahl der Masterpunkte.

### 4.1 Wahl des Versuchsbauteils

In akademischen Arbeiten dienen häufig geometrisch einfache Versuchsbauteile, wie beispielsweise Rundnöpfe, zur Untersuchung neuer Messkonzepte. Um der Serientauglichkeit im Presswerk Rechnung zu tragen, wird in diesem Forschungsprojekt ein reales Bauteil aus dem Automobilbau als Versuchsbauteil betrachtet. Außerdem kann so gleichzeitig eine Eignung des Messsystems für komplexe Bauteile nachgewiesen werden. Vor allem für diese Bauteile ist eine Prozessüberwachung von wirtschaftlicher Bedeutung für das Presswerk.

Für die Wahl des Versuchsbauteils wurden Ausschussquoten aus dem Jahr 2014 des Presswerks der BMW Group aus Dingolfing herangezogen. Abbildung 4.1 zeigt das Verhältnis von gerissenen Bauteilen, welche noch im Presswerk gefunden wurden, zur produzierten Gesamtmenge für verschiedene Serienbauteile. Sie gibt einen Überblick über typische, qualitätskritische Bauteile, zu denen vorwiegend Türen- und Klappenteile sowie Seitenrahmen zählen.

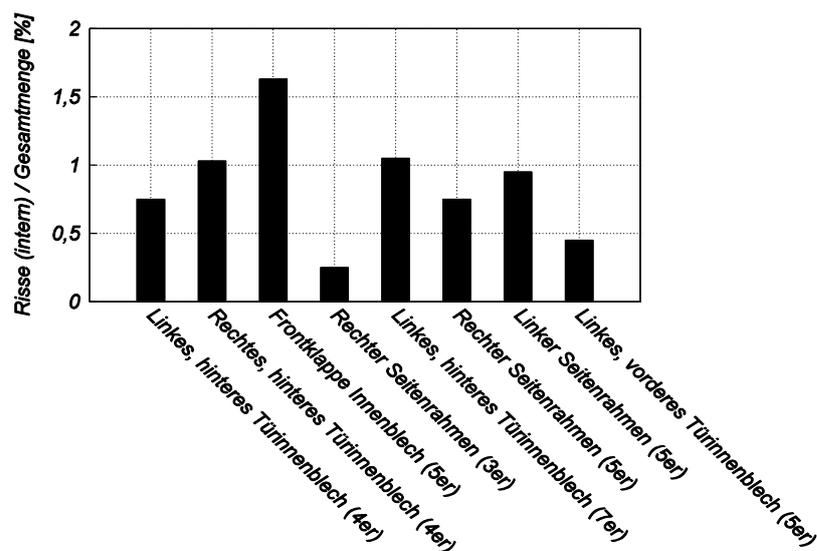


Abbildung 4.1: Ausschussquoten infolge von Reißern für verschiedene Bauteile aus dem Presswerk Dingolfing der BMW Group aus dem Jahr 2014

Für die Geometrie von Türen und Klappen sind deren Innenbleche maßgeblich. Diese Bauteile bilden die Struktur für sämtliche Anbauteile. Während die Anforderungen hinsichtlich ihrer Oberfläche vergleichsweise gering sind, müssen diese Strukturbauteile aber hohen Ansprüchen bezüglich ihrer Maßhaltigkeit erfüllen. Aufgrund der komplexen Geometrie und hohen Ziehtiefe zählen Türinnenbleche außerdem zu den risskritischen Bauteilen. Um die Potentiale einer Inline-Geometrie- und Einlaufwegmessung an einem Bauteil bestmöglich ausnutzen zu können, wurde deshalb das Türinnenblech der 5er Reihe von BMW als Versuchsbauteil ausgewählt. Zunächst wird der Herstellungsprozess dieses Bauteils veranschaulicht.

## 4.2 Herstellungsprozess

Als Ausgangsmaterial zur Herstellung des Versuchsbauteils dienen Formplatinen des Fusion-Werkstoffs *AlMg5,7/AlMg1* von Novelis mit einer Blechdicke von  $1,5\text{ mm}$ , welche in Stapeln von jeweils 290 Platinen termingerecht an die Pressenstraße geliefert werden. Pro Woche werden so jeweils ca. 7000 rechte und linke Türinnenbleche in Doppelfertigung hergestellt. Als Produktionspresse dient eine Pressenlinie mit hydraulischer Kopfpresse mit Sechs-Punkt-Ziehkissen und vier mechanisch angetriebenen Folgestufen.

Die Erzeugung des Einzelteils aus der Formplatine erfolgt durch insgesamt fünf Arbeitsfolgen (AFO), welche in Abbildung 4.2 zusammengefasst sind. Ausgehend vom Formplatinenzuschnitt (AFO10) folgen die Schritte:

- AFO15: Herstellung des Ziehteils durch kombiniertes Tief- und Streckziehen,
- AFO20: Gegenzug des unteren Schwellerbereichs des Türinnenbleches sowie erster Flanschbeschnitt,
- AFO25: Zweiter Flanschbeschnitt sowie weitere Schneidoperationen in Stößelrichtung,
- AFO30: Abststellungen an inneren Beschnittkanten im Nachformwerkzeug,
- AFO35: Fertigbeschnittoperationen sowohl in Stößelrichtung als auch durch Schieberwerkzeuge.

In der AFO15 wird der Erstzug des Bauteils durchgeführt. Eine Analyse des Umformprozesses an einer TryOut-Presse zeigte, dass erst kurz vor Erreichen des unteren Umkehrpunktes ein faltenfreies Bauteil hergestellt werden kann (vgl. Abbildung A.1).

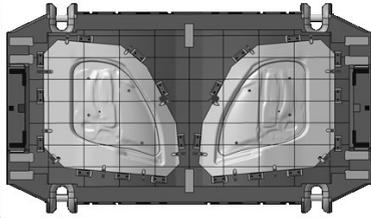
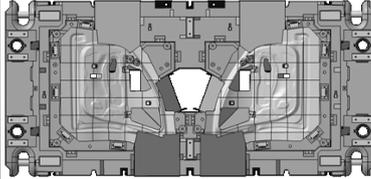
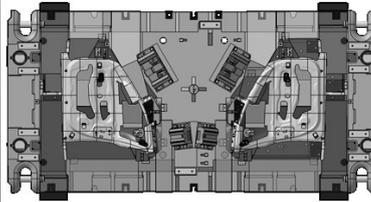
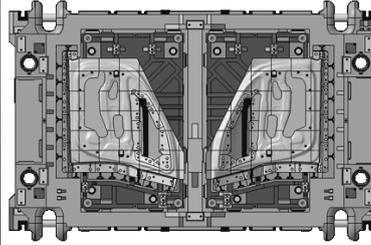
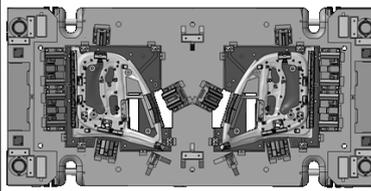
| <b>Bez.</b>   | <b>Beschreibung</b>                               | <b>Werkzeug</b>  | <b>Bauteil</b>  |
|---------------|---|--|---|
| <b>AFO 15</b> | Ziehwerkzeug<br>(Erstzug)                         |    |    |
| <b>AFO 20</b> | Nachzieh- und<br>Beschneidwerkzeug<br>(Weiterzug) |    |    |
| <b>AFO 25</b> | Beschneidwerkzeug                                 |    |    |
| <b>AFO 30</b> | Nachformwerkzeug                                  |   |   |
| <b>AFO 35</b> | Lochwerkzeug<br>mit Schiebern                     |  |  |

Abbildung 4.2: Übersicht der fünf Arbeitsfolgen (AFO) zur Herstellung des Versuchsbauteils sowie deren Werkzeuge und Bearbeitungsumfänge

Handlingsroboter entnehmen die Fertigteile aus dem letzten Nachfolgewerkzeug und legen diese auf das Auslaufband. Von dort werden die Bauteile durch Fachpersonal visuell geprüft und in angepasste Behälter eingeräumt. Im Zuge dessen wird jedes Bauteil visuell hinsichtlich dem Auftreten von Reißen oder Falten geprüft. Im nächsten Kapitel werden neben diesen Herstellbarkeitsfehlern sämtliche qualitätskritischen Bauteilbereiche aufgezeigt.

## 4.3 Qualitätskritische Bereiche

### 4.3.1 Maßabweichung

Die Maßhaltigkeit des Versuchsbauteils wird bezogen auf dessen Ausrichtung im RPS bewertet. Als Bezugskoordinatensystem dient das Fahrzeugkoordinatensystem. Die Messaufnahme aus Abbildung 4.3 ist an einer stehenden, starren Messplatte, entsprechend der Bauteil-Einbaulage am Fahrzeug, befestigt. Durch die Spanner 1 bis 3 und deren Auflagen erfolgt eine Fixierung in y-Richtung. In der x-z-Ebene dient jeweils ein Voll- und Schwertbolzen zur exakten Positionierung. Folglich können Zwischenbauteile aus den AFO15 bis 30 nicht vermessen werden, da die erforderlichen Aufnahmebohrungen für diese Bolzen erst im Fertigteil aus AFO35 enthalten sind. Die Messaufnahme besitzt zudem einen vierten Spanner (Spanner 4) in y-Richtung. Dieser wird geschlossen, wenn Flanschbereiche des Bauteils hinsichtlich ihrer Maßhaltigkeit zu analysieren sind. Bei Türinnenblechen wird dieses Spannkonzepkt als 4-Punkt-Auflage-Messung bezeichnet. Aufgrund der globalen Maßabweichung des Bauteils wäre eine Analyse dieser Bereiche des Bauteils mit einem Messaufbau entsprechend der 3-2-1-Regel (3-Punkt-Auflage-Messung) nicht möglich.

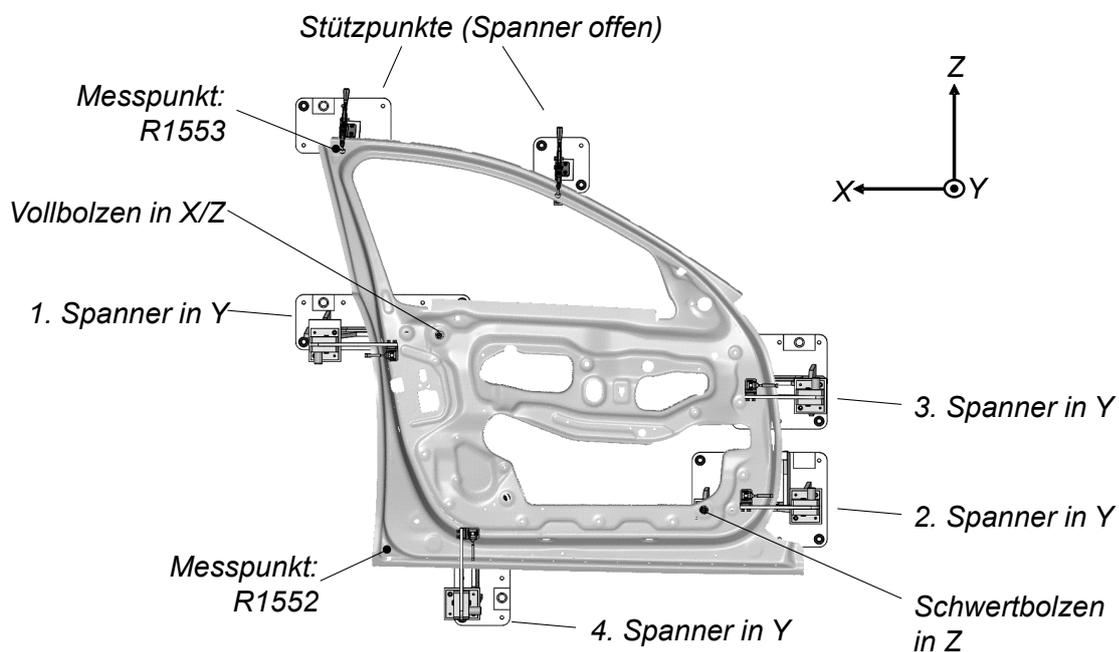


Abbildung 4.3: Messaufnahme eines Türinnenbleches, die Positionierung des Bauteils erfolgt über drei Auflageflächen (y-Richtung) mittels Spannern sowie einem Vollbolzen (x- und z-Richtung)- und Schwertbolzen (z-Richtung)

Für die Weiterverarbeitung des Versuchsbauteils im Karosseriebau spielt die 3-Punkt-Auflage-Messung eine wichtige Rolle. Dieses Spannkonzepkt macht die für Türinnenbleche typische,

globale Rückfederung sichtbar, welche in der Praxis als Bauteilverdrehung bezeichnet wird. Zusammengebaute Türen weisen ebenfalls eine solche Verdrehung auf und beeinflussen somit die Fugenmaße zwischen Tür und Karosserie am fertigen Fahrzeug. Eine Nachkorrektur dieses Verdrehungsmaßes durch manuelles Kraftrichten zur Einhaltung von Fugentoleranzen führt deshalb zu Mehraufwand in der Fahrzeugmontage.

Abbildung 4.4 zeigt das Ergebnis einer optischen Serienmessung nach dem 3-Punkt- und 4-Punkt-Prinzip des gleichen Bauteils in Form einer Falschfarbendarstellung. Rote Bereiche (Messpunkt R1552) kennzeichnen dabei positive Abweichungen von der Sollgeometrie, welche im unteren Schwellerbereich des Türinnenbleches auftreten. Blaue, negative Bereiche (Messpunkt R1553) liegen hinter der Sollgeometrie und treten typischerweise im Fensterbereich auf. Die in der Abbildung durch eine rot-gestrichelte Linie eingeschlossenen Bereiche werden durch das Spannkonzert nicht beeinflusst.

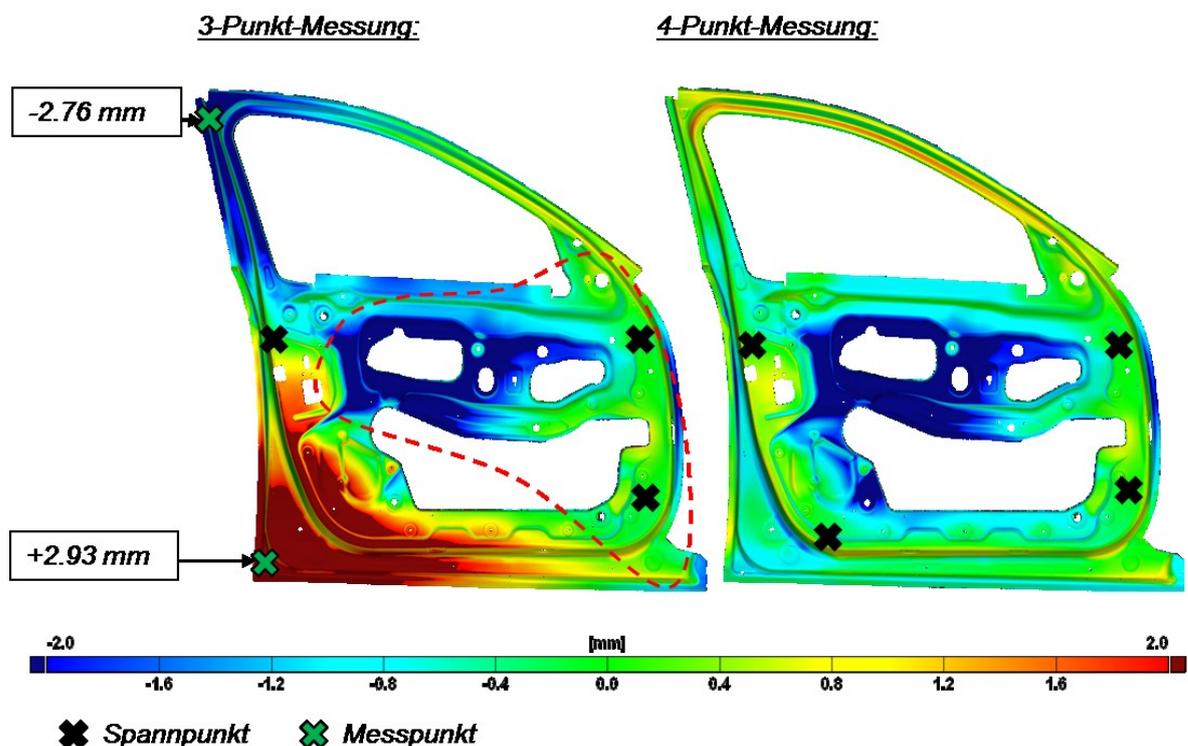


Abbildung 4.4: Optische Messung des Versuchsbauteils Türinnenblech mittels Streifenlichtprojektion nach dem Spannkonzert der 3-Punkt-Auflage (links) und 4-Punkt-Auflage

Eine Analyse der letzten 100 Serienmessungen des Versuchsbauteils nach dem 3-Punkt-Prinzip ist in Abbildung 4.5 dargestellt. In ihren Vorzeichen sind die Messpunkte R1552 und R1553 stets gleich, somit ist die Verdrehung der gemessenen Serienbauteile stets gleich gerichtet. Für das betrachtete Messintervall variiert der Messpunkt R1552 im Schweller zwischen 1,5 und

5,5 mm, während R1553 im Bereich von -2,5 und -6 mm liegt. Die Gegenüberstellung der Messpunkte zeigt außerdem eine Abhängigkeit zwischen den Messpunkten auf. Steigt der Betrag eines Messpunktes an, so wächst tendenziell auch der Betrag des anderen Messpunktes. Diese Beobachtung bestätigt die Bezeichnung des Rückfederungseffektes als Bauteilverdrehung.

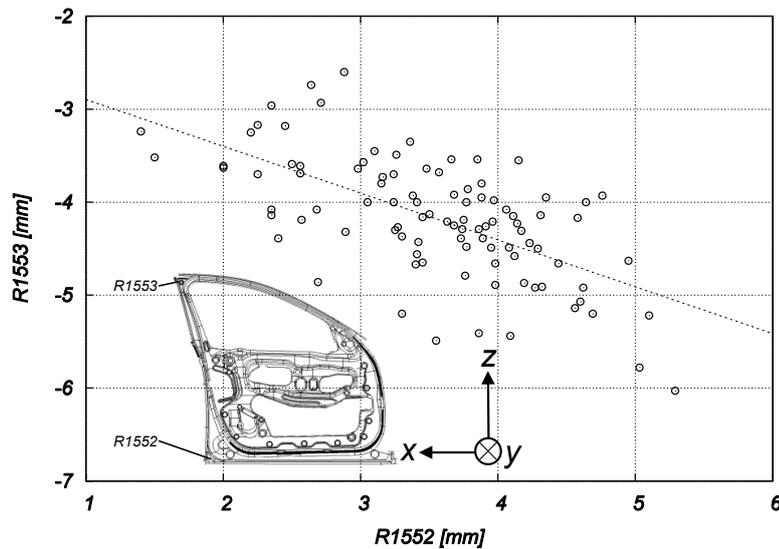


Abbildung 4.5: Auswertung der Messpunkte R1552 und R1553 (Abweichungen in y-Richtung) für 100 Serienmessungen des Versuchsbauteils

Für die Messpunkte R1552 und R1553 sind Toleranzfenster mit einer Breite von 1 mm seitens Karosseriebau gefordert. Diese Toleranzvorgabe kann im aktuellen Serienbetrieb nicht eingehalten werden. Während auf sichtbare Qualitätsfehler wie Risse oder Falten reagiert wird, sobald diese am Auslaufband der Presse entdeckt werden, sind Maßhaltigkeitsprobleme aktuell nur durch die stichprobenartigen Serienmessungen in externen Messräumen detektierbar. Eine Rückmeldung bezüglich der Bauteilgeometrie erfolgt somit stets zeitversetzt und eine unmittelbare Reaktion auf Prozessschwankungen ist nicht effizient durchführbar. Nennmaßabweichungen des Einzelteils im Karosseriebau müssen durch die gezielte Einstellung der Fügeprozesse kompensiert werden. Vor allem die auftretenden Sprünge in der produzierten Bauteilverdrehung sind für Probleme verantwortlich.

Für die einfachere Charakterisierung der Bauteilverdrehung wird nachfolgend die betragsmäßige Differenz der beiden Messpunkte der 3-Punkt-Messung des Versuchsbauteils gebildet:

$$\text{Bauteilverdrehung} = |R1552 - R1553| \quad (\text{Gl. 4.1})$$

In der Serienproduktion treten Schwankungen dieser Bauteilverdrehung zwischen 5 mm und maximal 12 mm auf. Dabei kann aus den stichprobenartigen Serienmessungen aus Abbildung 4.6 kein systematischer Verlauf für die Bauteilverdrehung erkannt werden. Für eine einwandfreie Verarbeitung des Türinnenbleches in den Nachfolgeprozessen, muss dessen Verdrehung aber in möglichst engen Grenzen liegen. Die exakte Ableitung dieser Prozessgrenzen ist jedoch schwierig, da die Geometrie des Türzusammenbaus durch die Einzelgeometrien zahlreicher Bauteile beeinflusst wird. Beispielsweise wird das Türinnenblech durch Rollbördeln mit der Außenhaut gefügt. Der Scharnierträger wird angeklebt, das Verstärkungsblech an das Innenblech geschraubt. Die Zielsetzung eines möglichst stabilen Fertigungsprozesses hinsichtlich der Innenblech-Geometrie im Presswerk ist somit ein nachvollziehbarer Ansatz.

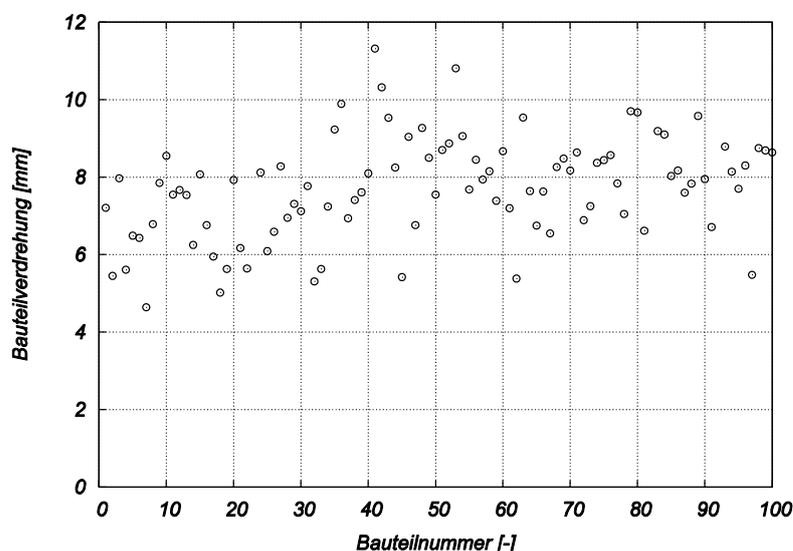


Abbildung 4.6: Auswertung der Bauteilverdrehung für 100 Serienmessungen des Versuchsbauteils

Während die Wiederholgenauigkeit der optischen Vermessung mittels Streifenlichtprojektion problemlos ausreicht, um die Maßabweichungen in Relation zur geforderten Toleranz zu prüfen, weist das Spannkonzert größere Fehleranfälligkeiten auf. So können kleinste Ungenauigkeiten bei der Positionierung von Spanner 3 das Messergebnis an den beiden Messpunkten aufgrund des großen Hebels verfälschen. Des Weiteren wird das Bauteil anhand von drei gefrästen Auflageflächen in y-Richtung fixiert. Die Orientierung dieser Flächen entspricht der Soll-Bauteilgeometrie, nicht aber der Real-Bauteilgeometrie. Die Spannkkräfte können daher zur Deformation des Bauteils führen.

Notwendig ist deshalb die Bewertung der Messgenauigkeit dieser Offlinemessung anhand von fünf Wiederholmessungen am gleichen Bauteil. In Abbildung 4.7 wird die Abweichung vom

Mittelwert für diese Einzelmessungen aufgezeigt. Die berechnete Standardabweichung beträgt 0,14 mm und wird durch horizontale Linien im Diagramm dargestellt. Bei einem fähigem Prüfmittel beträgt die Messungenauigkeit weniger als ein Zehntel des zu messenden Ergebnisses. Relativ zu den in Serie gemessenen Bauteilverdrehungen, ist diese Messungenauigkeit akzeptabel.

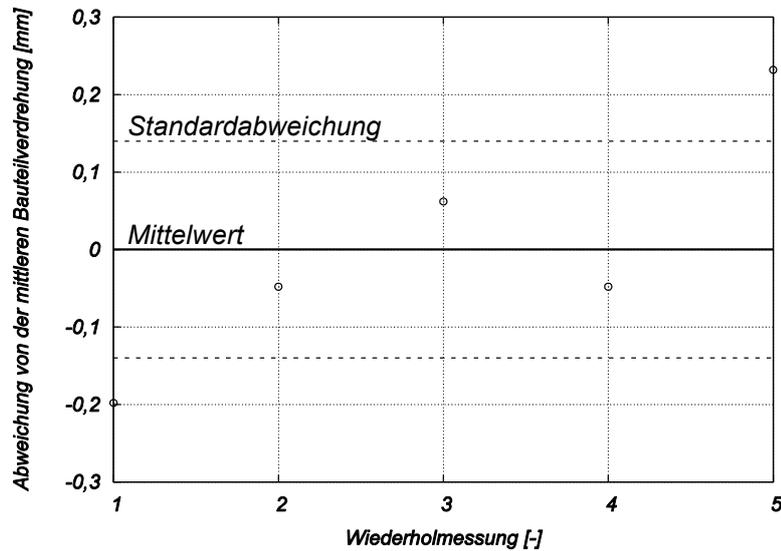


Abbildung 4.7: Bewertung der Wiederholgenauigkeit der Serienmessungen mittels fünf Wiederholmessungen am gleichen Bauteil

Neben unzulässig großen Maßabweichungen dürfen am ausgelieferten Bauteil keine, der im nächsten Abschnitt gezeigten, Herstellbarkeitsprobleme auftreten.

### 4.3.2 Risse, Falten und Welligkeiten

Über Informationsbildschirme am Auslaufband der Presse werden den Prüfmitarbeitern qualitätskritische Bereiche des aktuell produzierten Bauteils aufgezeigt. Für das Versuchsbauteil ist die aktuelle Prüfanweisung in Abbildung 4.8 veranschaulicht. Prinzipiell lassen sich Türinnenbleche in die Bereiche Schloss, Scharnier, Schweller und Fensterrahmen unterteilen. Die im Serienbetrieb vorwiegend aufgetretenen Risse sind rot dargestellt. Diese befinden sich in der Zarge an den Übergängen von Schloss und Scharnier zum Schwellerbereich. Dies sind typische Problembereiche von Türinnenblechen. Zu hohe Rückhaltung führt zur übermäßigen Ausdünnung und Rissbildung an diesen Stellen.

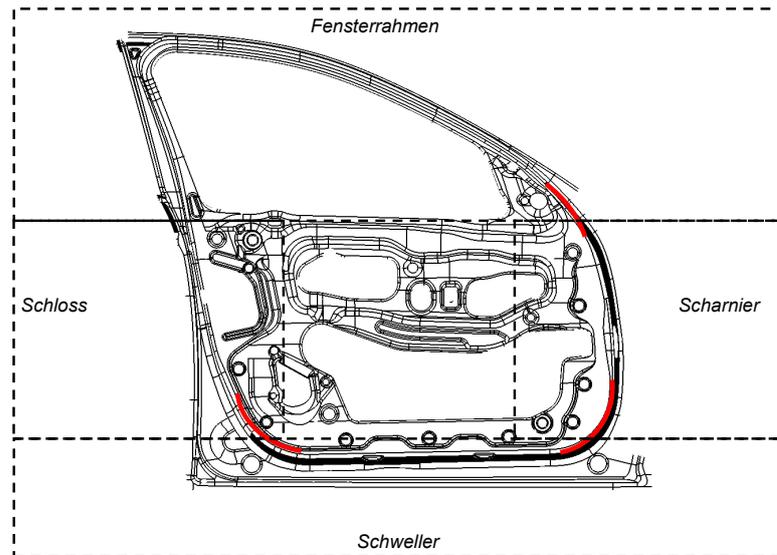


Abbildung 4.8: Prüfanweisung des Versuchsbauteils Türinnenblech mit Kennzeichnung der verschiedenen Bauteilbereiche

Am Fertigteil können außerdem Falten 1. und 2. Art auftreten. Falten 1. Art, welche zwischen Matrize und Blechhalter entstehen, sind am Versuchsteil im Schwellerbereich sichtbar. Sie treten auf, wenn in der Ziehstufe AFO15 zuviel Material nachfließt. Falten 2. Art bilden sich im Zargenbereich konischer Ziehteile aus und treten typischerweise in der Zarge am Schlossbereich auf. Beim Öffnen der Fahrzeugtür ist diese Fläche sichtbar, Falten sollten dort also vermieden werden. Abbildung 4.9 zeigt diese beiden Faltenarten.

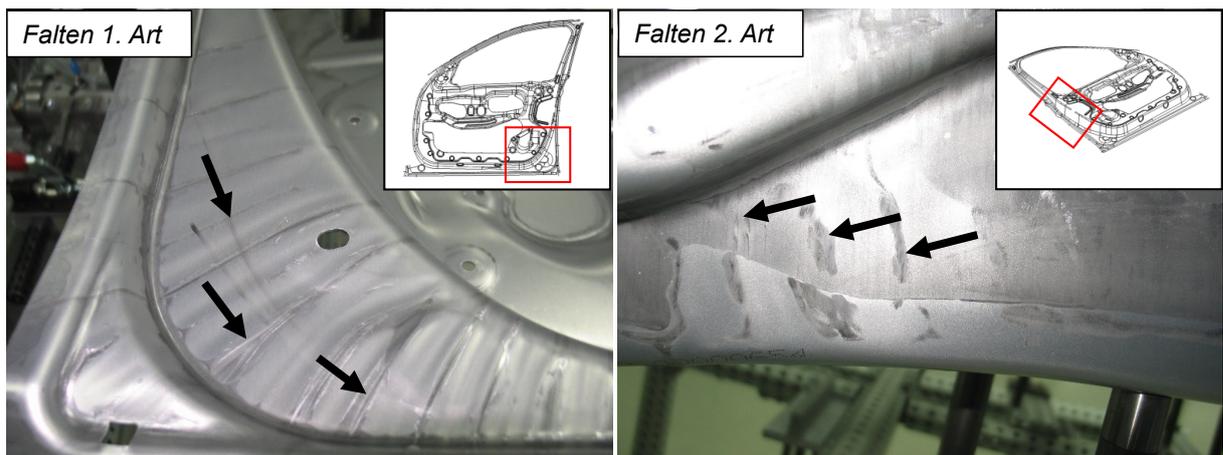


Abbildung 4.9: Falten 1. und 2. Art am untersuchten Türinnenblech

## 4.4 Werkstoff

### 4.4.1 Technische Lieferbedingungen

Die technischen Lieferbedingungen beschreiben ein Toleranzfenster hinsichtlich chemischer Zusammensetzung, mechanischem Verhalten, Schmierstoffauftrag und Blechdicke eines Blechmaterials. Bei der eingesetzten Aluminiumlegierung AlMg5,7/AlMg1 handelt es sich um ein von der Fa. Novelis Inc. mit der Fusion<sup>TM</sup>-Technologie hergestelltes Mehrschichtblech. Dieser Schichtaufbau ermöglicht die Kombination unterschiedlicher Eigenschaften. Das Kernmaterial weist eine vergleichsweise hohe Festigkeit auf. Aufgrund des Überzuges aus AlMg1 wird gleichzeitig eine gute Umformbarkeit erreicht. (Köth, 2009)

Für den Werkstoff AlMg5,7/AlMg1 wird die in Tabelle 4.1 aufgelistete chemische Zusammensetzung gefordert.

Tabelle 4.1: Anforderungen an die chemische Zusammensetzung des Kernmaterials der Legierung AlMg5,7/AlMg1

| Si    | Fe     | Cu     | Mn    | Mg        | Cr    | Zn     | Ti     |
|-------|--------|--------|-------|-----------|-------|--------|--------|
| in %  | in %   | in %   | in %  | in %      | in %  | in %   | in %   |
| ≤ 0,3 | ≤ 0,35 | ≤ 0,15 | ≤ 0,5 | 5,4 – 5,8 | ≤ 0,1 | ≤ 0,25 | ≤ 0,15 |

Tribologische und mechanische Kenngrößen sind für jedes Kaltband stichprobenartig bei Wareneingang zu prüfen. Tabelle 4.2 gibt einen Überblick der geforderten Eigenschaften.

Tabelle 4.2: Technische Lieferbedingungen der Versuchslegierung AlMg5,7/AlMg1

| $R_m$               | $R_{p0,2}$          | $A_g$ | $A_{80}$ | $n$    | $r$   | $\frac{R_{p0,2}}{R_m}$ | $R_a$      |
|---------------------|---------------------|-------|----------|--------|-------|------------------------|------------|
| in $\frac{N}{mm^2}$ | in $\frac{N}{mm^2}$ | in %  | in %     | in %   | in %  | –                      | in $\mu m$ |
| ≥ 250               | 105 – 150           | ≥ 23  | ≥ 26     | ≥ 0,28 | ≥ 0,6 | ≤ 0,55                 | 0,6 – 1,3  |

Treten im Fertigungsprozess Herstellbarkeitsprobleme auf, werden zur Fehleranalyse weitere Zugversuche durchgeführt. In Abbildung 4.10 ist die Streckgrenze über der Zugfestigkeit aus insgesamt 78 Zugversuchen unterschiedlicher Kaltbandsorten aufgetragen. Lediglich die Streckgrenze dreier Proben lag seit Analysebeginn über den geforderten Spezifikationen.

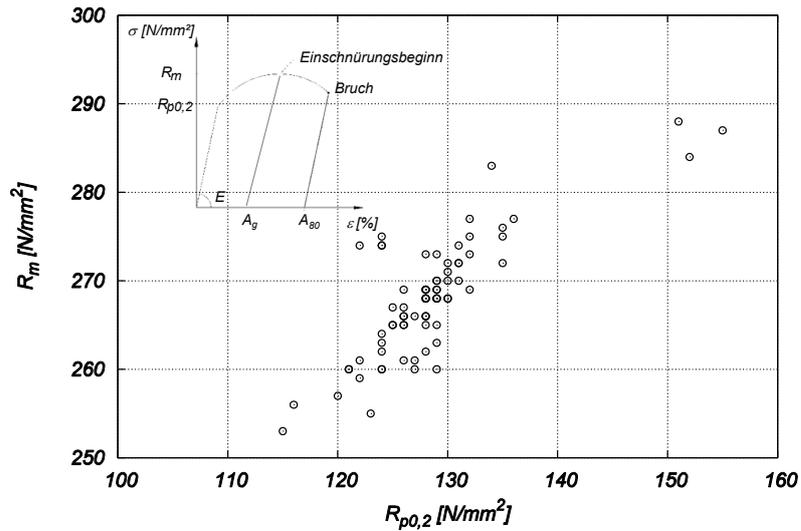


Abbildung 4.10: Streckgrenze und Zugfestigkeit aus 78 serienbegleitenden Zugversuchen in-  
folge von Materialreklamationen des Presswerks

Analog dazu zeigt Abbildung 4.11 die Auswertungsergebnisse, der im Zugversuch ermittelten  
technischen Dehnungen.

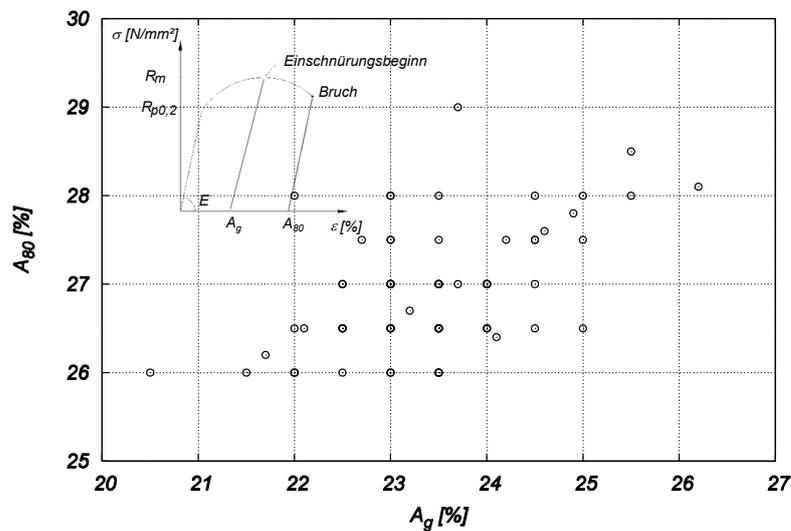


Abbildung 4.11: Gleichmaß- und Bruchdehnung aus 78 serienbegleitenden Zugversuchen

An den Blechplatinen wird ein beidseitiger Auftrag des Trockenschmierstoffes DryLub E1 von  
 $0,7 \frac{g}{m^2}$  gefordert. Die Blechdicke von 1,5 mm darf nicht mehr als 0,05 mm abweichen.

#### 4.4.2 Versuche zur Materialcharakterisierung

Ziel der Materialcharakterisierung ist die Erstellung einer Materialkarte für nachfolgende Umformsimulationen. Aus drei verschiedenen Kaltbändern wurden dafür Flachzugversuche entsprechend DIN EN ISO 6892-1 B mit einer Prüfgeschwindigkeit von  $0,067 \text{ s}^{-1}$  durchgeführt (DIN 6892, 2009). Pro Band wurden insgesamt neun Proben entnommen, jeweils drei Stück pro Walzrichtung. Entsprechend Abbildung 4.12 deckt der Zugversuch nur Umformgrade bis etwa 0,2 ab. Durch Bulge-Versuche lässt sich ein größerer Bereich der Fließkurve für die Umformsimulation abbilden.

Die Versagensgrenze des Blechwerkstoffs wird in Form einer Grenzformänderungskurve durch Nakajima-Versuche ermittelt. Insgesamt acht unterschiedliche Probengeometrien dienen zur Erzeugung unterschiedlicher Dehnpfade und Versagenspunkte infolge von Einschnürung im Grenzformänderungsdiagramm. Aufgrund des mehrschichtigen Aufbaus ist die Versagensvorhersage für Fusion<sup>TM</sup>-Materialien durch das herkömmliche Grenzformänderungsdiagramm schwierig (Hora et al., 2016). Grundlegende Erkenntnisse zur Materialmodellierung (Abhängigkeiten der Fließkurve sowie Fließortskurve) von Aluminium-Fusion Werkstoffen wurden durch Gorji (2015) erbracht und für die in dieser Arbeit nachfolgenden Simulationen eingesetzt.

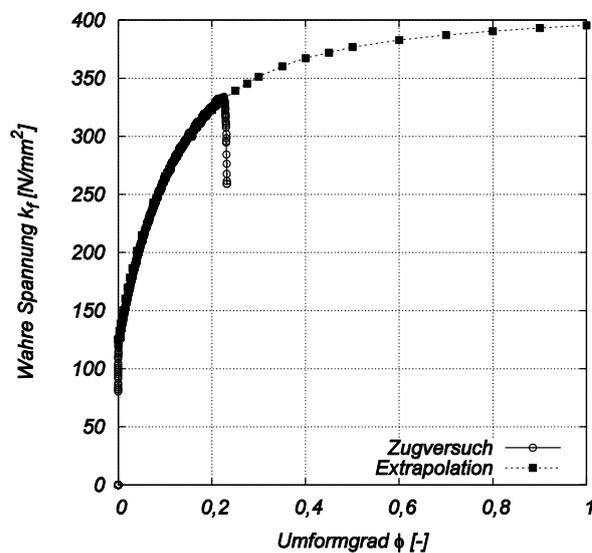


Abbildung 4.12: Fließkurve und Einzel-Zugversuchsergebnis von AlMg5,7/AlMg1

#### 4.5 Analyse des Umformprozesses

Für eine Einlaufwegmessung im Serienbetrieb sind diejenigen Messpunkte am Bauteil relevant, welche von den typischen Schwankungen der Platinen-Eigenschaften am stärksten beeinflusst werden. Die gezielte Erzeugung von Versuchsbauteilen mit bekannten Eingangsgrößen und die

Analyse ihres Einlaufverhaltens ermöglicht die Identifikation dieser Punkte. In der Realität ist die Bereitstellung von solchen maßgeschneiderten Platinen problematisch, da aus zahlreichen Kaltbändern Materialproben entnommen werden müssen, um deren Eigenschaften zu erfassen. Der Einsatz von Umformsimulationen stellt eine vergleichsweise aufwandsarme Alternative zur Untersuchung dieser Ursache-Wirkungskette dar. Bevor der Einfluss der Parameterschwankungen über die Simulation untersucht werden kann, muss jedoch ein Abgleich zwischen Realität und Simulation erfolgen, um einen gemeinsamen Betriebspunkt festzulegen. Im ersten Schritt sind dafür die beiden Ziehstufen aus AFO15 und AFO20 in der Simulation aufzubauen.

#### 4.5.1 Simulation der Ziehstufen

Zur Modellierung der Ziehstufe AFO15 werden die Flächenmodelle der Werkzeugkomponenten Matrize, Blechhalter und Stempel durch tetraedrische und quadratische, starre Flächenelemente dargestellt. Die Platinengeometrie wird ebenfalls durch solche Flächenelemente beschrieben, denen das elasto-plastische Materialverhalten des im vorherigen Abschnitt beschriebenen Werkstoffs zugrunde liegt. Weitere Informationen zur Vernetzung finden sich in Abbildung A.2. Die Platinenlage wird durch Grobeinweiser in der Simulation berücksichtigt. Um ein akzeptables Ergebnis zwischen Simulation und Realität zu erzielen, wurden nachfolgende Startwerte für die Simulationseinstellungen festgelegt:

- **Blechhalterkraft:** Im realen Produktionsprozess sind Blechhalterkräfte pro Bauteil von insgesamt 850 bis 1100 kN üblich. Startwert für den Abgleich sind 1100 kN. Für diesen Wert wurde das Bauteil ursprünglich geplant.
- **Reibzahl:** Die Reibzahl für die Reibpartner Aluminium und Stahl mit Prelube beträgt für die erste Simulation 0,12.
- **Platinengeometrie:** Die Übereinstimmung der Platinenlage und -geometrie wurde mit der Realität abgestimmt.
- **Ziehgeschwindigkeit:** Prinzipiell zeigen AlMg-Legierungen eine negative Dehnratenempfindlichkeit, d.h. der Fließwiderstand sinkt mit zunehmender Dehngeschwindigkeit. Aufgrund der geringen absoluten Empfindlichkeit im Vergleich zu den Stahl-Legierungen wird der Einfluss der Umformgeschwindigkeit hier vernachlässigt. (Ostermann, 2015)

Das mit diesen Einstellungen erzeugte Ziehteil dient anschließend als Eingangsgröße für die Simulation von AFO20. Die Ziehteilgeometrie wird zusammen mit dessen Dehnungs- und Spannungsinformationen als Bauteil-Startzustand für AFO20 eingefügt. Während in AFO15

die Blechhalterkraft durch die Druckzylinder im Ziehkissen verstellbar werden kann, ist dies für die AFO20 nicht automatisiert möglich. Im Oberteil befinden sich Gasdruckfedern, deren Druck nur manuell durch Veränderung der Gasmenge verstellbar werden kann. Neben dem Blechhalter ist in dieser Ziehstufe auch ein Niederhalter vorhanden. Die Starteinstellungen für AFO20 sind:

- **Blechhalterkraft:** Aus Expertengesprächen ging hervor, dass ein sinnvoller Schätzwert für die eingestellte Blechhalterkraft ca. der Hälfte der maximalen Gasdruckfederkraft entspricht. Als Startwert werden 1100 kN festgelegt. Dieser Wert wird schrittweise, bis auf die Hälfte, reduziert.
- **Reibzahl:** Die Reibzahl wird aus AFO15 übernommen.

Einen Überblick über den Aufbau dieser beiden Ziehstufen gibt die Abbildung 4.13.

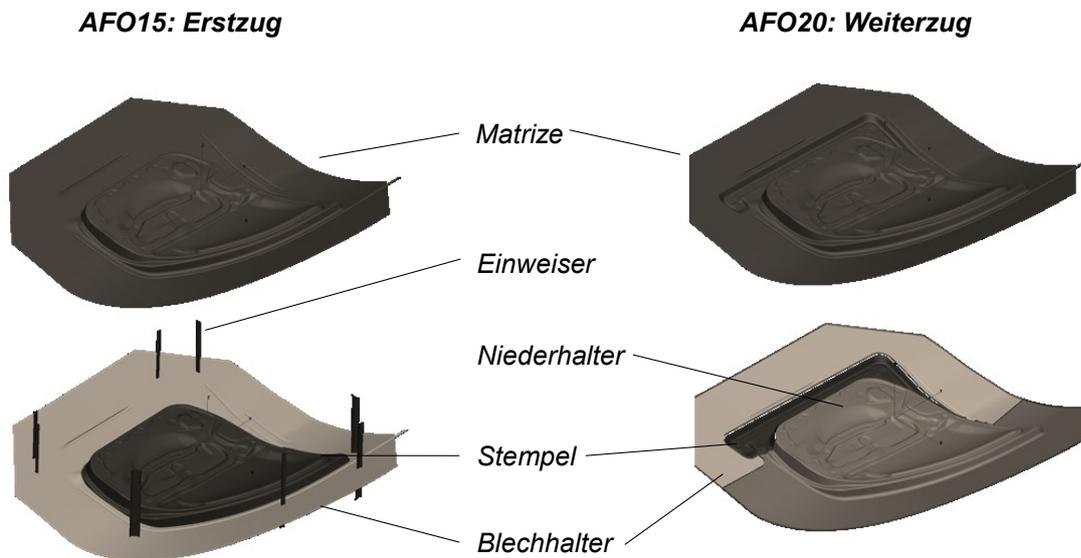


Abbildung 4.13: Aufbau der Ziehstufen AFO15 und AFO20, bestehend aus den Werkzeugen Blechhalter, Stempel und Matrize sowie Niederhalter und Einweiser

Für die Durchführung von Sensitivitätsanalysen werden die Parameter Reibzahl, Fließkurve und Blechhalterkraft in AFO15 variiert. Die in AFO15 getroffenen Einstellungen werden anschließend in AFO20 übernommen. Wird beispielsweise der Einfluss der Reibzahl untersucht, so wird diese in AFO15 und AFO20 gleichermaßen verändert.

#### 4.5.2 Analyse des Realprozesses

Die Übereinstimmung von Simulation und Realität soll anhand der Prozessgröße bewertet werden, welche auch im Zuge der nachfolgenden Sensitivitätsanalysen ausgewertet wird. Somit

erfolgt der Abgleich anhand des Einlaufweges in verschiedenen Bauteilbereichen. Die Betrachtung des Flanscheinzugs ist für diesen Vergleich jedoch problematisch. Zum einen müssen aus dem Fertigungsprozess Bauteile für die Prozessanalyse ausgeschleust werden, deren exakte Platinengröße nicht bekannt ist. Zum anderen kann der Flanscheinzug nur an Ziehteilen der AFO15 und eingeschränkt in AFO20 überprüft werden. Um auch am Fertigteil Informationen zum Materialeinlauf generieren zu können, wird deshalb die Anhaukante als Maß für den Einlaufweg herangezogen. Ungenauigkeiten bezüglich der Platinenlage und -abmessung wirken sich nicht auf die Anhaukante aus. Sie kann heute standardmäßig als Simulationsergebnis ausgegeben werden.

Eine objektive, wiederholgenaue Messung der Anhaukantenposition mittels Stahllineal oder Messschieber ist schwierig, wenn als Bezug Radiausläufe am Bauteil dienen. Sinnvoller ist der Einsatz speziell angefertigter Schablonen, welche über Bezugselemente wie Löcher exakt und wiederholgenau am Bauteil positioniert werden können. Versuchsweise können außerdem Mikrokameras an den Schablonen befestigt werden, um die Eignung von Flächenkameras zur optischen Detektion von Anhaukanten abzuschätzen. Abbildung 4.14 zeigt die drei Bereiche am Bauteil, an denen die Anhaukantenposition mittels angepasster Schablonen und Mikrokameras erfasst wird. Diese Bereiche wurden vorab, zusammen mit Produktionsspezialisten, festgelegt. Die Position der Anhaukante wird aus den aufgenommenen Bildern für jeden Bereich mit Hilfe einer Bildverarbeitungssoftware bestimmt (KEYENCE CORPORATION, 2017). Die Wiederholgenauigkeit aus 10 Messvorgängen (Positionierung Schablonen + Bildaufnahme und Auswertung) der Anhaukantendetektion beträgt, gemessen an der Standardabweichung der Absolutpositionen, wenige hundertstel Millimeter.

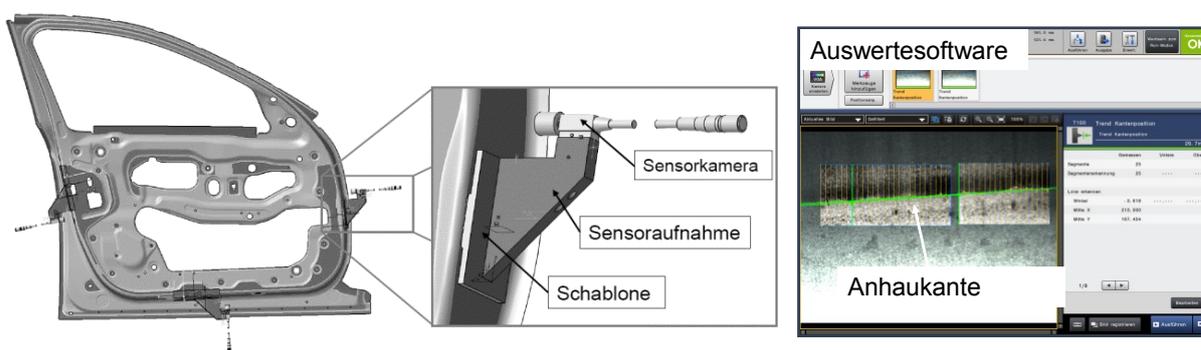


Abbildung 4.14: Konstruierte Schablonen zur Aufnahme von Mikrokameras für die Anhaukantendetektion in drei Bauteilbereichen sowie Auswertungssoftware zur Bildverarbeitung

Während der Nachformung des Türinnenbleches in der AFO20 fließt Material sowohl von au-

ßen ein, als auch von der Zarge zurück. Die am Fertigteil platzierten Schablonen erfassen somit den resultierenden Einlaufweg aus beiden AFOs. Entsprechend Abbildung 4.15 ist diese Besonderheit für die Bereiche Schloss und Schweller zu beachten. Aus der Simulation können nur die Informationen aus AFO20 direkt mit den so aufgenommenen Messdaten verglichen werden.

Insgesamt 20 Fertigbauteile aus zwei unterschiedlichen Kaltbändern dienen als Datenbasis für die Analyse des Realprozesses. Abbildung 4.15 veranschaulicht exemplarisch die Messergebnisse im Schwellerbereich. Die ersten zwölf Bauteile aus Kaltband 1 (KB1) weisen im Mittel eine Position von 18,7 mm auf. Für KB2 kann infolge der Anhaulantenposition ein um ca. 0,8 mm größerer Einlaufweg identifiziert werden. Als Referenzwert für die Simulation wird der Mittelwert aus KB1 herangezogen.

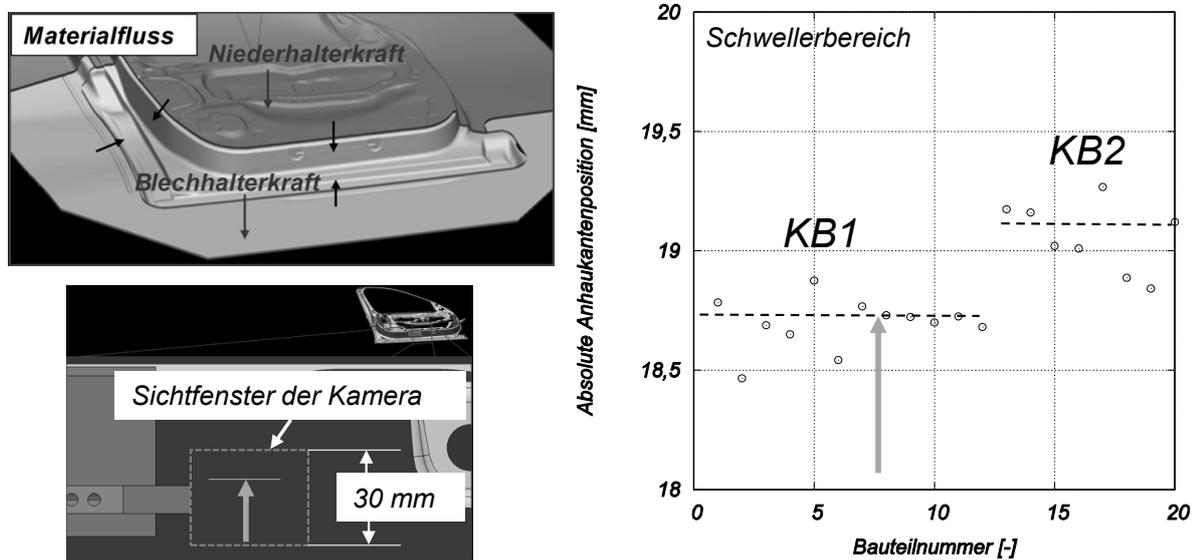


Abbildung 4.15: Auswertung der absoluten Anhaulantenposition im Schwellerbereich für Bauteile aus zwei Kaltbändern

### 4.5.3 Abgleich von Simulation und Realität

Aus den Konstruktionsdaten der Schablonen lässt sich für jeden Bauteilbereich eine Referenzkante zur Messung der Simulations-Anhaulante ableiten. Abbildung 4.16 veranschaulicht diese Vorgehensweise beispielhaft für den Schwellerbereich. Die Montageebene der Mikrokamera aus dem CAD-Modell der Schablone dient in der Simulation als Bezugsebene. Sie liegt in der Mitte des von der Mikrokamera aufgenommenen Bildausschnittes. Aus der Simulation wird der Abstand der Anhaulante zu dieser Mittelebene ausgewertet. In PAM-STAMP<sup>®</sup> wird die Anhaulante über das „Maximum Pressure over time“ Kriterium ermittelt Hahn, 2004. Nachdem die Sicken ausgeprägt wurden, herrscht in den Bereichen der Platine, welche sich zwischen Matrize und Blechhalter befinden, die höchste Flächenpressung. Über die gesamte Umformung

ist dies die größte Last, welche die Elemente erfahren. Mit dem Kriterium werden am Ende der Umformung diese Elemente, welche zu Beginn der Umformung zwischen Blechhalter und Matrize lagen, farblich dargestellt. Die ersten Elemente am Rande des Matrizenradius kennzeichnen somit die Lage der Anhaukante am Fertigteil. Im Detail betrachtet handelt es sich also in der Simulation nicht um eine exakte Linie, sondern um eine Aneinanderreihung von Flächenelementen. Die Elementkantenlänge im Bereich der Anhaukanten liegt bei einem Millimeter, sie limitiert die Genauigkeit der Positionsbestimmung in der Simulation.

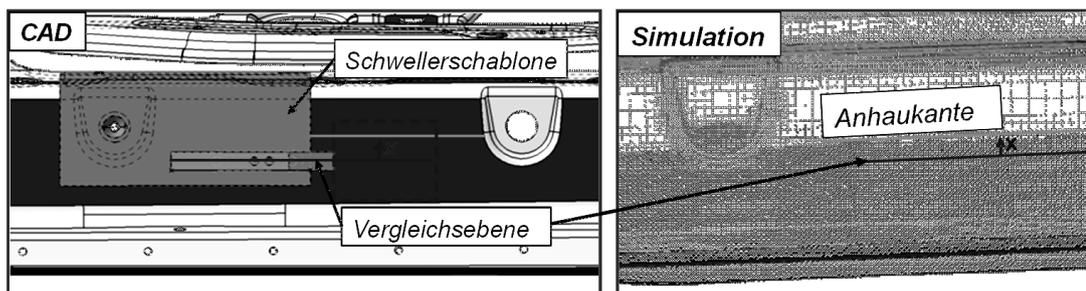


Abbildung 4.16: Vorgehensweise zum Vergleich der Simulation mit dem Realprozess

Ausgehend von den gewählten Startwerten für die Simulation wurden die Parameter Blechhalterkraft und Reibzahl an den Materialfluss des Realbauteils entsprechend Abbildung 4.17 angepasst. Der Mittelwert der Anhaukantenposition von KB1 im Kamera-Sichtbereich liegt bei 18,7 mm (vgl. Abb. 4.15). Von der Vergleichsebene der Schablone gemessen entspricht dies einem Zielwert von +3,7 mm. Mit einer Reibzahl von 0,12 und einer Blechhalterkraft von 1200 kN liegt die berechnete Anhaukantenposition aus AFO15 bei +4,57. Die Nachformung des Schwellerbereichs in AFO20 beeinflusst die Position der Anhaukante jedoch entscheidend. Desto höher die Blechhalterkraft in dieser Stufe gewählt wird, umso weiter entfernt sich die Anhaukante von ihrer ursprünglichen Lage aus AFO15. Mit den selben Einstellungen für AFO20 ergeben sich deutliche Unterschiede zwischen den Anhaukantenpositionen aus Simulation und Realität von mehr als 10 mm (Lage nach AFO20 bei -7 mm), da die Rückhaltung zu groß ist. Es folgte die stufenweise Reduzierung der Blechhalterkraft und Reibzahl. Eine gute Übereinstimmung mit dem Realbauteil von KB1 ergibt sich schließlich für die Blechhalterkräfte 900 (AFO15) und 400 kN (AFO20) sowie einer Reibzahl von 0,1. Für diese Einstellung verändert sich die Position der Anhaukante im Schweller in AFO20 um ca. 5 mm. An nacheinander produzierten Stationsteilen konnte diese Größenordnung des Einflusses von AFO20 bestätigt werden.

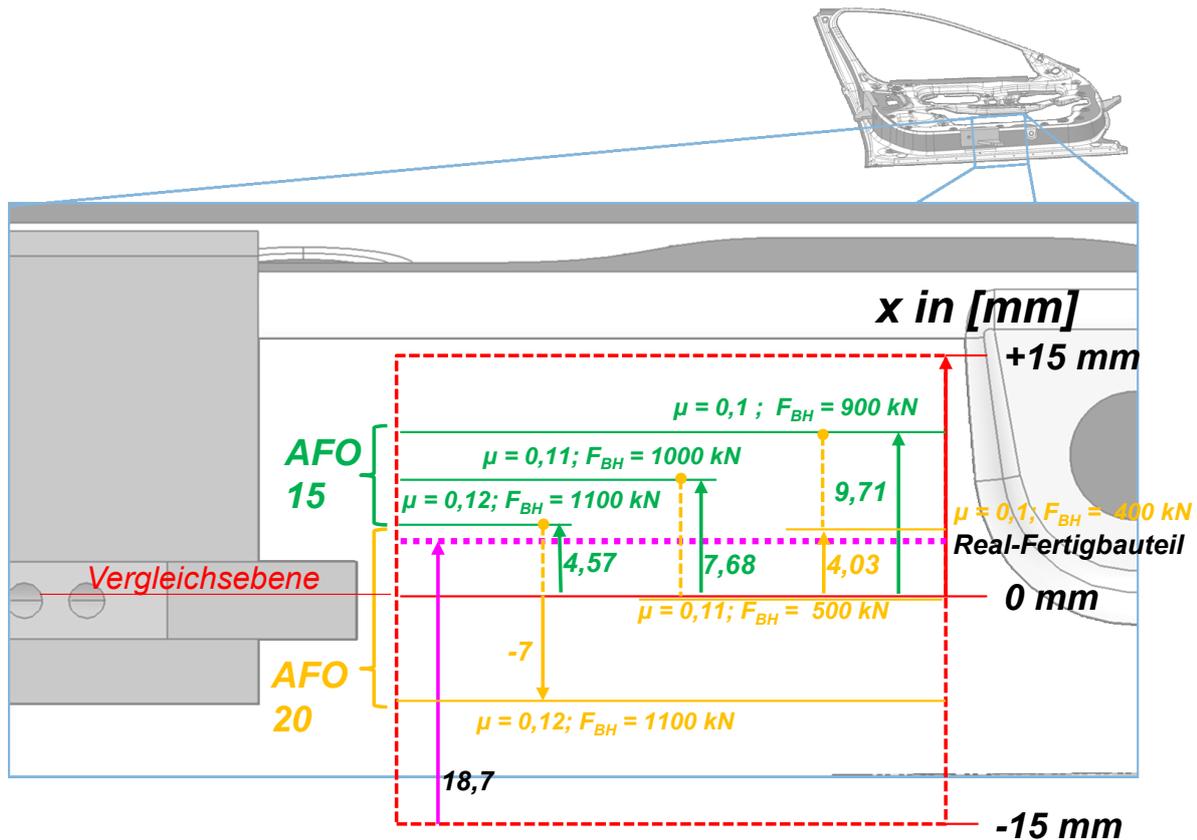


Abbildung 4.17: Vergleich der Anhaulanten aus Simulation und Realität im Schwellerbereich für verschiedene Parameter aus AFO15 und AFO20

Für die Wahl dieser Parameter spricht auch die Übereinstimmung der beiden anderen untersuchten Bauteilbereiche. Abbildung 4.18 stellt die Ergebnisse dieses Abgleichs qualitativ gegenüber. Interessant ist außerdem eine Unterbrechung im Verlauf der Anhaulante nahe des Scharnierbereichs, welche in engem Zusammenhang mit dem Einlaufweg steht. Sie entsteht aufgrund von Faltenbildung am Anfang des Umformprozesses. Bei höherer Rückhaltung tritt diese Falte nicht auf, sodass der Verlauf der Anhaulante nicht unterbrochen wird. Dieser Effekt kann auch an den Analysebauteilen aus KB1 und KB2 beobachtet werden. Bei KB2 ist der Verlauf vollständig unterbrochen aufgrund der geringeren Rückhaltung und folglich größeren Faltenbildung. Ergänzend dazu finden sich qualitative Vergleiche des Flanscheinzuges aus Simulation und Realität in Abbildung A.3.

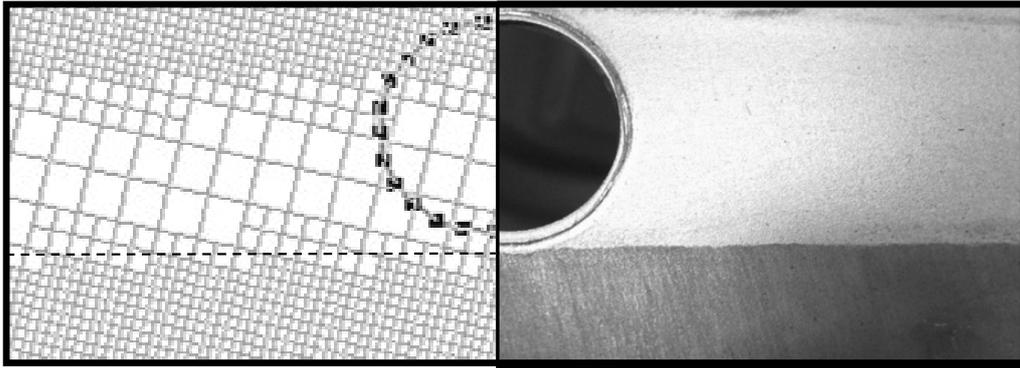
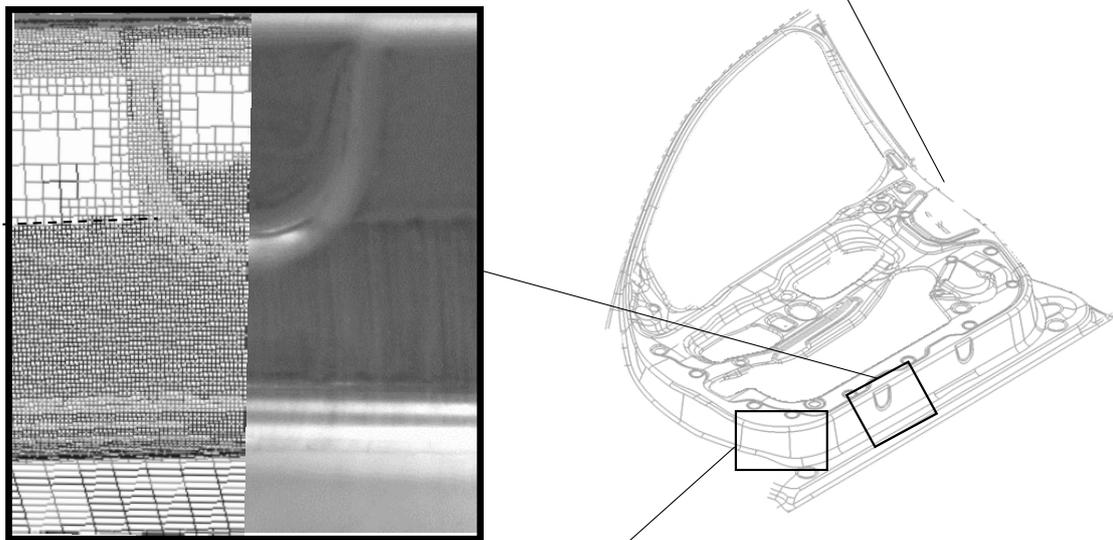
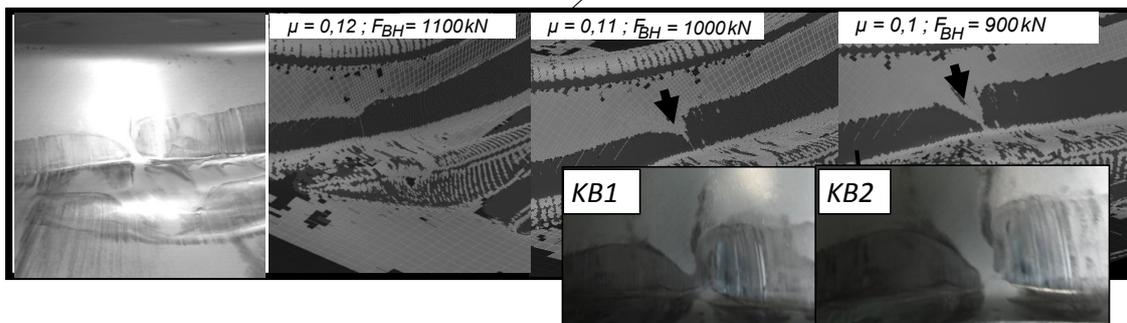
**Schlossbereich:****Schwellerbereich:****Scharnierbereich:**

Abbildung 4.18: Qualitativer Vergleich der Anhaulanten aus Simulation und Realität

Neben der Durchführung des Abgleichs konnten durch den Einsatz von Mikrokameras erste Erfahrungen bezüglich des Einsatzes von Flächenkameras für die Anhaulantendetektion gewonnen werden. Die Detektion der Anhaulante war mit derselben Einstellung für alle Bauteile möglich, außerdem spricht die hohe Wiederholgenauigkeit für den Einsatz von Flächenkameras. Letztendlich kann aber nur die Erfassung einer ausreichenden Datenbasis beim Einsatz in der Produktionsumgebung die Serientauglichkeit bestätigen.

#### 4.5.4 Sensitivität des Einlaufverhaltens

Ausgangsbasis für die Sensitivitätsanalyse ist der absolute Einlaufweg der abgeglichenen Referenzsimulation, welcher nach Abbildung 4.19 entsprechend Winkelkoordinaten einer Materialflussrichtung von 0 bis 360° am Bauteil zugeordnet wird. Je nach Bereich treten Einlaufwege zwischen 20 und 60 mm auf, wobei im Schlossbereich sowie am Übergang zwischen Scharnier und Fensterrahmen die größten Werte zu verzeichnen sind.

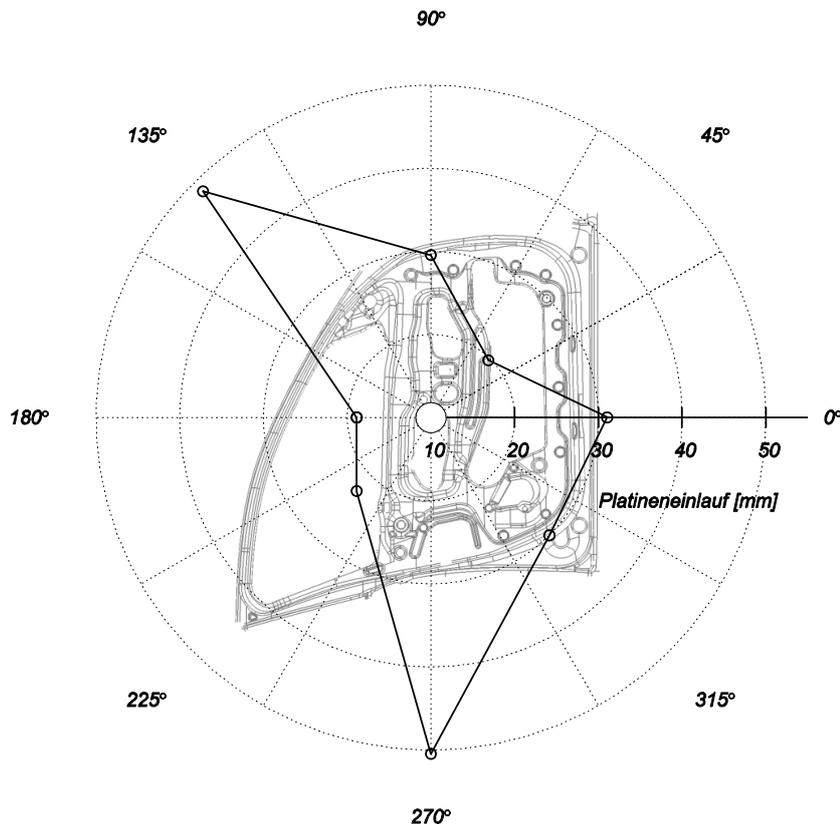


Abbildung 4.19: Einlaufweg der validierten Referenzsimulation, ausgewertet hinsichtlich absoluter, lokaler Verschiebungen im Flanschbereich des Bauteils

Ausgehend von diesem Einlaufwegprofil wird anschließend der Einfluss der presswerksrelevanten Platinen-Eigenschaften untersucht. Diese sind die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes, modelliert durch die Fließkurve, sowie die Reibzahl, stellvertretend für Schmierung und Rauigkeit. Zudem wird der Einfluss der Blechhalterkraft, welche eine wichtige Stellgröße für den Serienbetrieb darstellt, betrachtet. Abbildung 4.20 stellt die Differenz des Einlaufweges der Referenzsimulation zu drei alternativen Simulationen mit geänderten Einstellungen da.

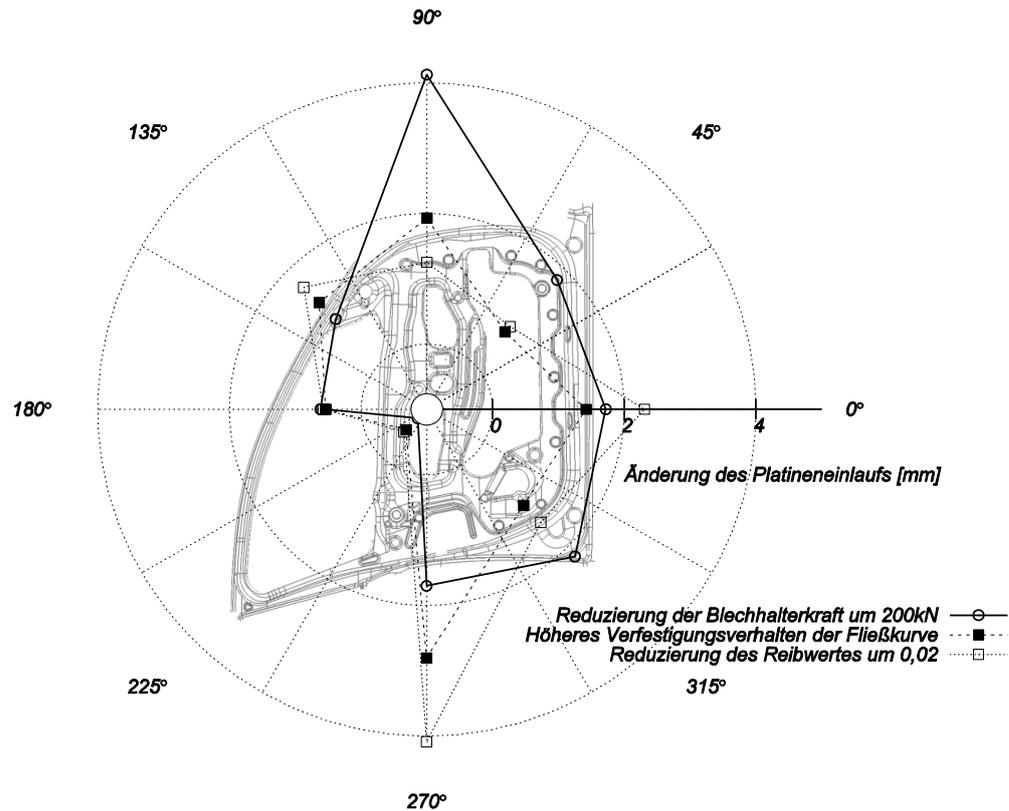


Abbildung 4.20: Änderung des Einlaufweges am Bauteil infolge geänderter Eingangsgrößen (Blechhalterkraft, Fließkurve, Reibung) bezogen auf die Referenzsimulation

Aufgrund des ohnehin kleinen, absoluten Einlaufweges im Bereich des oberen Fensterrahmens (225°) zeigen Prozessänderungen vergleichsweise kleine Auswirkungen von weniger als einem Millimeter. Eine Reduzierung der Blechhalterkraft um 200 kN führt im Scharnierbereich zur größten Erhöhung des Einlaufweges von über 5 mm. Eine Verringerung der Reibzahl um 0,02 wird hingegen besonders im Schlossbereich sichtbar, der dann ebenfalls um ca. 5 mm weiter einläuft. Begründet wird dies durch die hohe Ziehtiefe in diesem Bereich. Über den Umformvorgang summiert sich der Reibungseinfluss dort auf. Der Einfluss der Fließkurve wird durch eine Verfestigungssteigerung untersucht, die insgesamt auch im Schlossbereich den größten Einfluss zeigt. Vor allem sind es somit die Bereiche Schloss und Scharnier, welche die größten Reaktionen im Einlaufweg hinsichtlich der Änderung der presswerksrelevanten Einflussgrößen zeigen.

#### 4.6 Zusammenfassung: Identifikation der Masterpunkte

Aus dem Prüfkonzept des Messraums, der sogenannten Drei-Punkt-Auflage Messung, ergeben sich fünf relevante Messpunkte für ein werkzeugintegriertes Inline-Messsystem. Diese sind drei Auflagepunkte, an denen das Bauteil im Raum ausgerichtet wird, sowie zwei Punkte an denen

die Verdrehung des Bauteils gemessen wird. Somit sollten mindestens fünf Messpositionen zur Inline-Geometriemessung vorgesehen werden.

Zur simulationsgestützten Analyse des Platineneinlaufs wurde im ersten Schritt ein Abgleich der Anhaulante in drei charakteristischen Bauteilbereichen durchgeführt. Sensitivitätsanalysen zeigten anschließend, dass die Bereiche Schloss und Scharnier am empfindlichsten auf die presswerkstypischen Prozessschwankungen reagieren. Eine Inline-Einlaufwegmessung sollte somit an diesen beiden Bereichen realisiert werden. In unmittelbarer Nähe zu diesen Messorten traten zudem, die in der Prüfanweisung angezeigten, Reißer am Bauteil auf.

## 5 Entwicklung und Umsetzung des Pilotsystems

Die ermittelten Masterpunkte sollen beispielhaft für das untersuchte Türinnenblech mit einem Pilotsystem überwacht werden. Innerhalb von Nachfolgewerkzeugen existieren keine Erfahrungen bezüglich der Messung qualitätsrelevanter Kenngrößen. Somit müssen neue Messkonzepte zur Geometrie- und Einlaufwegmessung erdacht und durch geeignete Messtechnik umgesetzt werden. Dabei soll der Produktionsprozess nicht verändert oder durch die Messung beeinträchtigt werden.

### 5.1 Überwachung geometrischer Merkmale in Nachfolgewerkzeugen

#### 5.1.1 Grundkonzept

In den Nachfolgewerkzeugen sind im Allgemeinen Beschnitt- und Nachformoperationen umgesetzt. Jeder Produktionsschritt beeinflusst die Geometrie des Türinnenbleches, da sich durch diese Operationen die Bauteilsteifigkeit oder innere Spannungszustände verändern. Um somit eine Vergleichbarkeit zwischen herkömmlichen Messungen im Messraum und der Inline-Messung zu erleichtern, muss die Fertigteilgeometrie im letzten Werkzeug überwacht werden.

Die Auflageflächen des Trennwerkzeuges AFO35 entsprechen der Sollgeometrie des Fertigbauteils. Abbildung 5.1 zeigt ein Versuchsbauteil, welches manuell eingelegt wurde. Infolge des Unterschiedes zwischen Bauteil- und Auflagegeometrie liegt es nicht flächig auf dem Aufsatz auf. Die charakteristische Verdrehung des Bauteils wird sichtbar. Es besteht somit die Vermutung, dass die Bauteilgeometrie sowie deren Schwankungen, an einem frei im Aufsatz liegenden Bauteil erfasst werden können.



Abbildung 5.1: Exemplarisch eingelegtes Bauteil im Nachfolgewerkzeug AFO35

Basierend auf dieser Vermutung wird in Abbildung 5.2 ein allgemeines Messkonzept zur Erfassung geometrischer Masterpunkte in Nachfolgewerkzeugen dargestellt. Nach dem Einlegen

des Bauteils durch den Transportfeeder schließt das Werkzeug und der Bearbeitungsvorgang wird ausgeführt. Jedes Bauteil wird zu diesem Zeitpunkt infolge der Niederhalterkraft auf seine Sollgeometrie gedrückt. Ausgehend von einem gemeinsamen Sollzustand entspannt sich jedes Bauteil nach dem Öffnen des Werkzeuges und dem Abheben des Niederhalters. Nach diesem letzten Arbeitsschritt kann die Bauteilgeometrie mittels Abstandssensoren an den Masterpositionen relativ zur Aufsatzgeometrie erfasst werden.

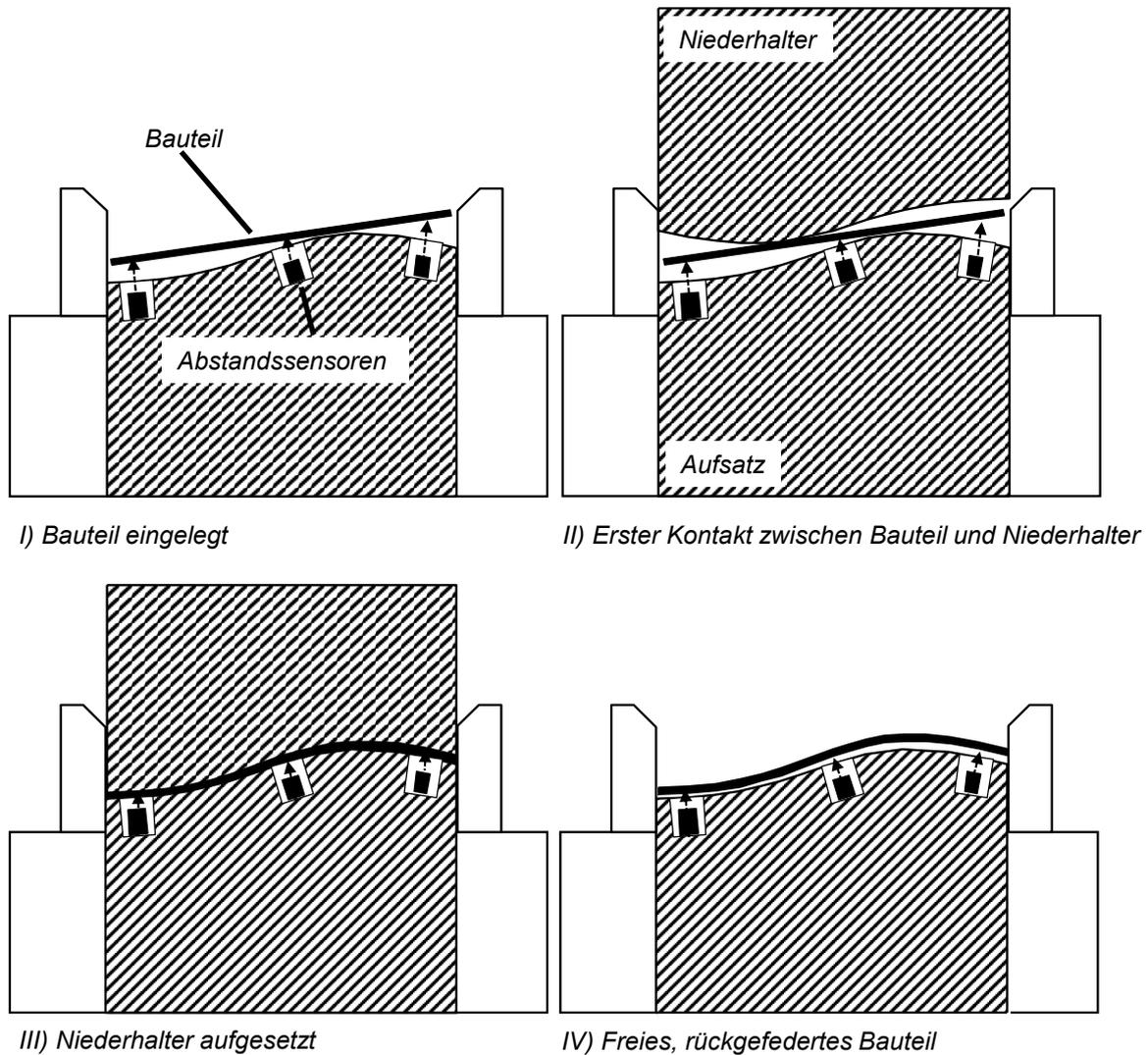


Abbildung 5.2: Verschiedene Zeitpunkte eines Werkzeughubes

Während das Bauteil im Messraum an seinen Referenzpunkten gespannt wird, handelt es sich hier um ein freies, ungespanntes Bauteil. Um einen Vergleich zwischen den Messungen zu ermöglichen, erfolgt mittels einer Koordinatentransformation eine Ausrichtungsberechnung. Dazu wird ein werkzeuggebundenes Koordinatensystem mit Hilfe der Information von drei Messpunkten, den Referenz-Masterpunkten am Bauteil, in ein bauteilspezifisches Koordina-

tensystem transformiert. Abbildung 5.3 veranschaulicht mögliche bauteilspezifische Koordinatensysteme für verschiedene Bauteile aus dem Automobilbau. Je nach dem zu bewertenden Geometriemerkmal können auch mehrere bauteilspezifische Koordinatensysteme sinnvoll sein. Die dargestellte Dachaußenhaut wird im Karosseriebau auf die Karosserie geklebt. Zur Sicherstellung eines stabilen Fügeprozesses müssen die Bauteilecken während des Klebens bis zum Aushärten des Klebstoffs flächig aufliegen. Zur Kontrolle dieses spezifischen Merkmals könnte ein solches Bauteilkoordinatensystem eingeführt und die Maßhaltigkeit der vierten Bauteilecke überwacht werden. Wohlmöglich auftretende Starrkörperverschiebungen des freien Bauteils am Werkzeug und deren Einfluss auf das Messergebnis werden durch eine Koordinatentransformation kompensiert.

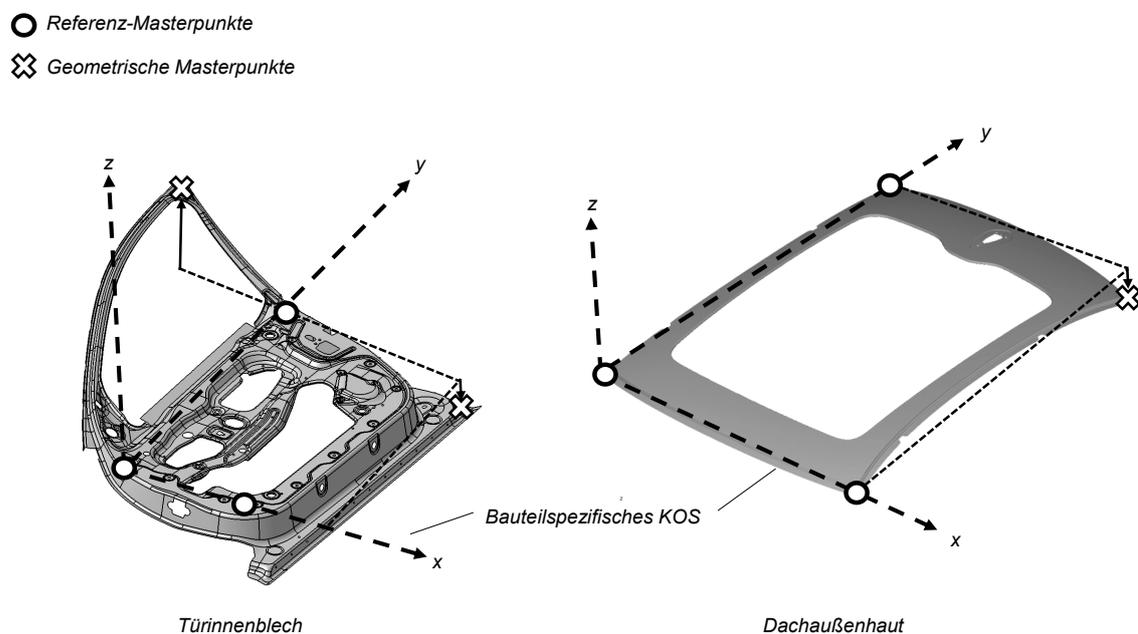


Abbildung 5.3: *Beispielhafte, bauteilspezifische Koordinatensysteme (KOS) für Türinnenblech und Dachaußenhaut*

Das Grundkonzept der Geometriemessung in Nachfolgewerkzeugen basiert auf der Annahme, dass aussagekräftige Informationen aus Abstandsmessungen und geeigneten Transformationen am ungespannten Bauteil generiert werden können. Zum Nachweis ihrer Richtigkeit erfolgt zunächst die Planung eines Pilotsystems durch die Auswahl geeigneter Sensoren.

### 5.1.2 Auswahl der Abstandssensoren

Die Auswahl des Abstandssensors für die Messung der geometrischen Masterpunkte geschieht unter Berücksichtigung verschiedener technischer Anforderungen:

- **Robustheit:** Infolge der rauen Presswerksumgebung müssen schmutz- und schockunempfindliche Sensoren eingesetzt werden.
- **Integrierbarkeit:** Die Sensoren sollten möglichst kompakt sein und durch einfache Geometrien, wie Gewindebohrungen, montiert werden können. Eine einfache Integrierbarkeit geht mit einer leichteren Standardisierbarkeit einher.
- **Messbereich:** Dies ist der Bereich zwischen minimal und maximal messbarem Abstandswert des Sensors. Prinzipiell sollte der Messbereich des Sensors möglichst groß sein.
- **Messfrequenz:** Im Falle von Bauteilschwingungen können Mittelwertberechnungen bei hoher Messfrequenz die Ergebnisqualität verbessern. Somit sollte die Messfrequenz des Sensors möglichst groß sein.

Wie bereits Neumann (2013) erkannte, weisen Wirbelstromsensoren zur Abstandsmessung ein großes Potential zum Einsatz in der Presswerksumgebung auf. Im Vergleich zu optischen Lasersensoren sind sie robust gegenüber Verschmutzungen (Adam et al., 1997). Aufgrund Ihrer Bauform, ähnlich eines Gewindestifts, sind sie leichter integrierbar und auch hinsichtlich einer möglichen Standardisierung im Werkzeugbau einfacher zu planen. Lediglich der vergleichsweise geringe Messbereich ist nachteilig für Wirbelstromsensoren.

Der erforderliche Messbereich der Abstandssensoren ergibt sich aus den lokalen Abständen zwischen Bauteil und Aufsatzfläche. Zur Abschätzung des erforderlichen Messbereiches wurde zuerst die Werkzeugaufsatzfläche optisch gemessen und digitalisiert. Anschließend wurde ein exemplarisches Versuchsbauteil manuell platziert und ebenfalls gemessen. Die beiden digitalisierten Flächen ermöglichen die Ermittlung lokaler Abstände. Die Aufsatzfläche wird dabei um den Wert der Bauteilblechdicke von  $1,5\text{ mm}$  korrigiert, somit weisen Kontaktbereiche zwischen Bauteil und Werkzeug einen Wert von ca.  $0\text{ mm}$  auf. Über eine Falschfarbendarstellung entsprechend Abbildung 5.4 können die lokalen Abstände identifiziert werden. In den Bereichen der Masterpunkte betragen die Abstände zwischen  $1$  und  $5\text{ mm}$ .

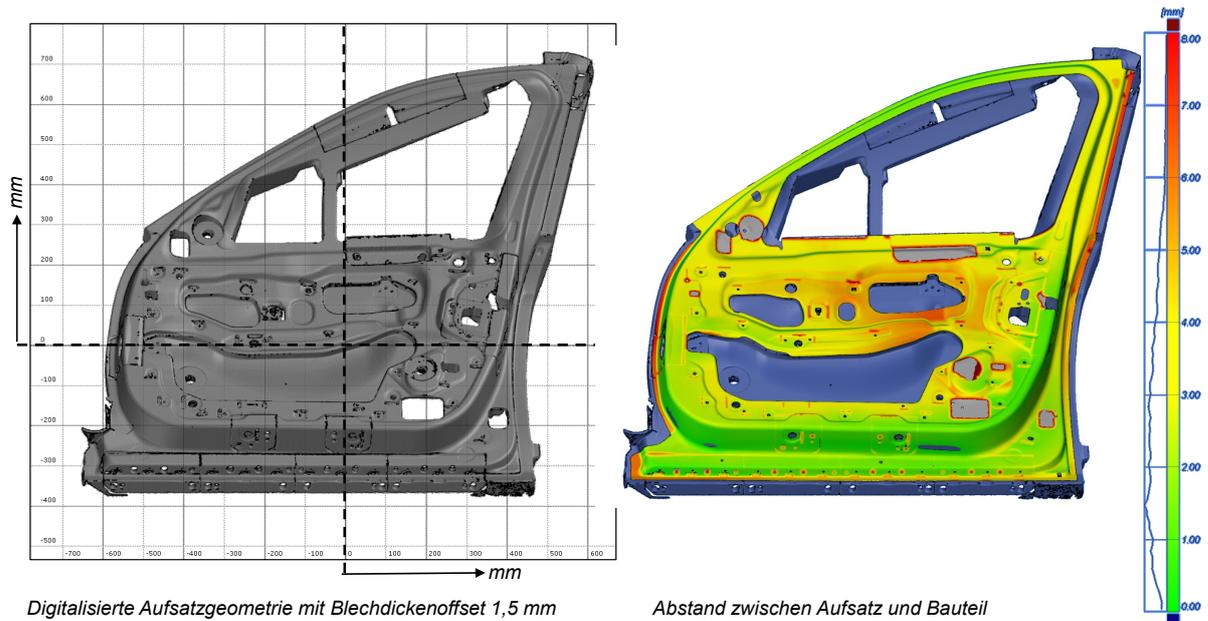


Abbildung 5.4: *Optische Vermessung des realen Aufsatzes mit Versuchsbauteil zur Abschätzung des erforderlichen Sensor-Messbereichs*

Basierend auf dieser Abschätzung wurde der Wirbelstrom-Abstandssensor Eddy-NCDT 3010 mit der Bauform U6 und einem Messbereich von 0,6 bis 6,6 mm der Micro-Epsilon Messtechnik GmbH&Co.KG ausgewählt. Abbildung 5.5 gibt eine Übersicht über die technischen Daten des Sensors. Da es sich um einen ungeschirmten Wirbelstromsensor handelt, muss bei der Montage im Werkzeug eine ausreichend große Zylindersenkung, von mindestens dreifachem Sensor-Nenndurchmesser, vorgesehen werden. Eine Auswertelektronik, der Controller DT3010-A, verarbeitet das Sensorsignal. Für Messobjekte aus Aluminium liefert der Controller Spannungssignale zwischen 0 und 10 V bei Abständen von 0,6 bis 6,6 mm.

Da es sich beim Versuchswerkstoff AlMg5,7/AlMg1 um eine spezielle Aluminiumlegierung handelt, wurde die Messgenauigkeit des Sensorsystems überprüft. Dazu wurde der Sensor an einer Präzisions-Koordinatenmessmaschine befestigt. Das ausgegebene Abstandssignal des Sensors wurde mit den Verfahrwegen der Anlage verglichen. Am Messbereichsende ergibt sich so eine absolute Abweichungen von 45  $\mu\text{m}$ . Da für das vorgestellte Messkonzept relative Abweichungen zwischen den Bauteilen ausgewertet werden, wurde der gemessene Fehler in dieser Größenordnung toleriert und keine Sonderkalibrierung vorgenommen.

Berücksichtigt werden muss bei diesem Vergleich, dass die Parallelität zwischen Messoberfläche und Sensorfläche wesentlich zur Genauigkeit der Messung beiträgt. An realen Karosserieteilen weisen selbst scheinbar ebene Oberflächen Krümmungen auf, welche das Messergebnis des Wirbelstromsensors beeinträchtigen. Für die Planung der Sensorpositionen am Werkzeug-



einschränken. Abbildung 5.7 gibt einen Überblick über die fünf Positionen. Die Sensoren an den Positionen  $R_3$ ,  $G_1$  und  $G_2$  wurden dabei an Orte mit ebenen Bauteilbereichen verschoben.

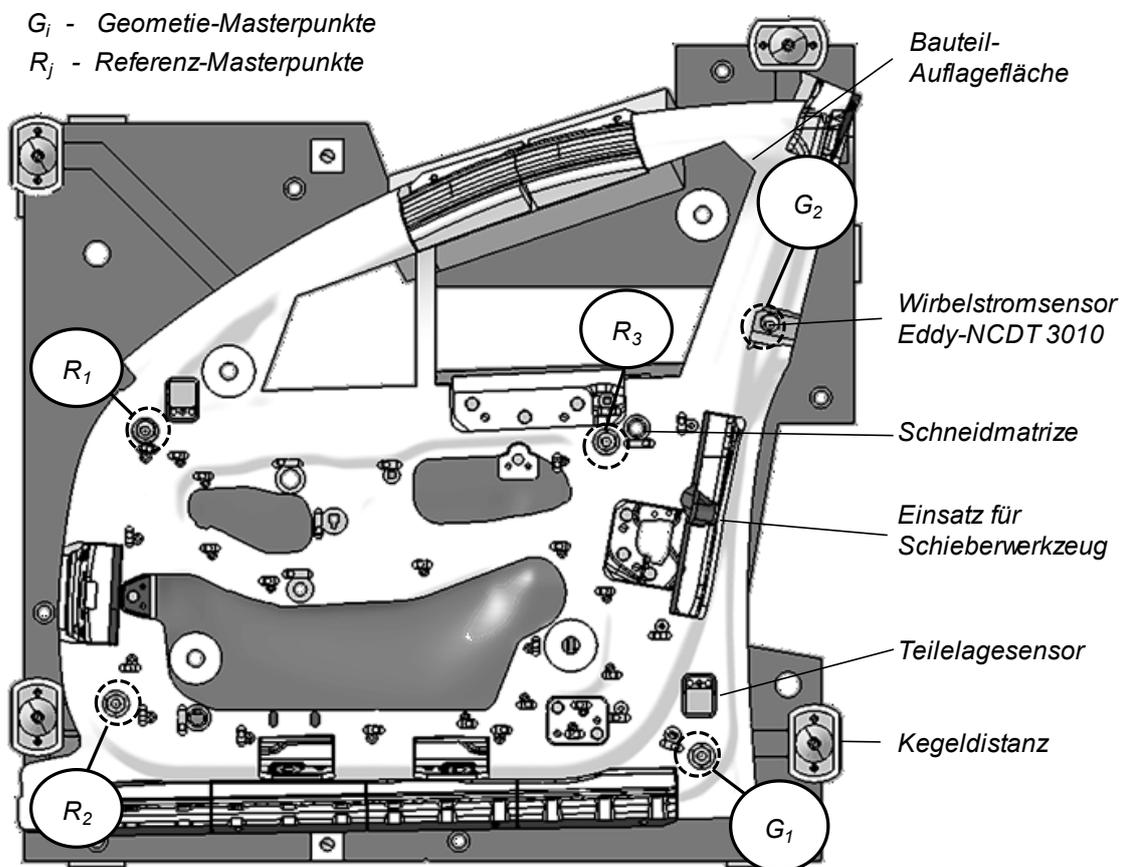


Abbildung 5.6: Positionen der fünf Wirbelstromsensoren am Werkzeugaufsatz sowie Benennung spezifischer Komponenten

Die mechanische Bearbeitung an einer Großfräsmaschine im Werkzeugbau umfasste die Anfertigung der Zylindersenkungen und Durchgangs-Gewindebohrungen M18x1. Die Sensorkabel werden nach unten, zwischen den Rippen des Aufsatzes, abgeführt. Abbildung 5.7 gibt einen Überblick über die am Werkzeug verbauten Komponenten. Mit Hilfe einer Aufnahmeplatte sind die Aufbereitungselektroniken, Controller und Messverstärker am Werkzeugunterkasten befestigt. Über den Werkzeugstecker, der auch die Teilelagesensoren mit Strom versorgt, werden sämtliche Komponenten mit 24 V Gleichspannung betrieben. Eine Recheneinheit mit zwei Netzwerkkarten ermöglicht den Datentransport ins Produktionsnetzwerk mittels WLAN-Antenne. Das Messsystem wird so voreingestellt, dass Recheneinheit und Messprogramme automatisch starten, sobald der Werkzeugstecker beim Rüsten des Werkzeugs an der Presse verbunden wird. Neben den Wirbelstromsensoren befindet sich auch ein Laser-Distanz-Sensor mit einem Messbereich von 0,2 bis 6 m am Unterkasten, der die Position des Werkzeugoberkas-

tens aufnimmt. Über die Messsignale dieses Sensors wird der Aufnahmezeitpunkt für die Geometriemessung gesteuert. Als Auswertungssoftware dient die zum Messverstärker MX1605-R passende Software Catman Easy der Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, diese ist auf dem Werkzeugrechner installiert. Sie ermöglicht die Festlegung von Bedingungen zum Start und Beenden eines Messzyklus. Dadurch können die Abstandswerte der Sensoren nicht nur zu einem Zeitpunkt, sondern für einen Zeitraum vom Aufsetzen des Niederhalters bis zur Entspannung des Bauteils, für jeden Pressenhub, aufgenommen werden.

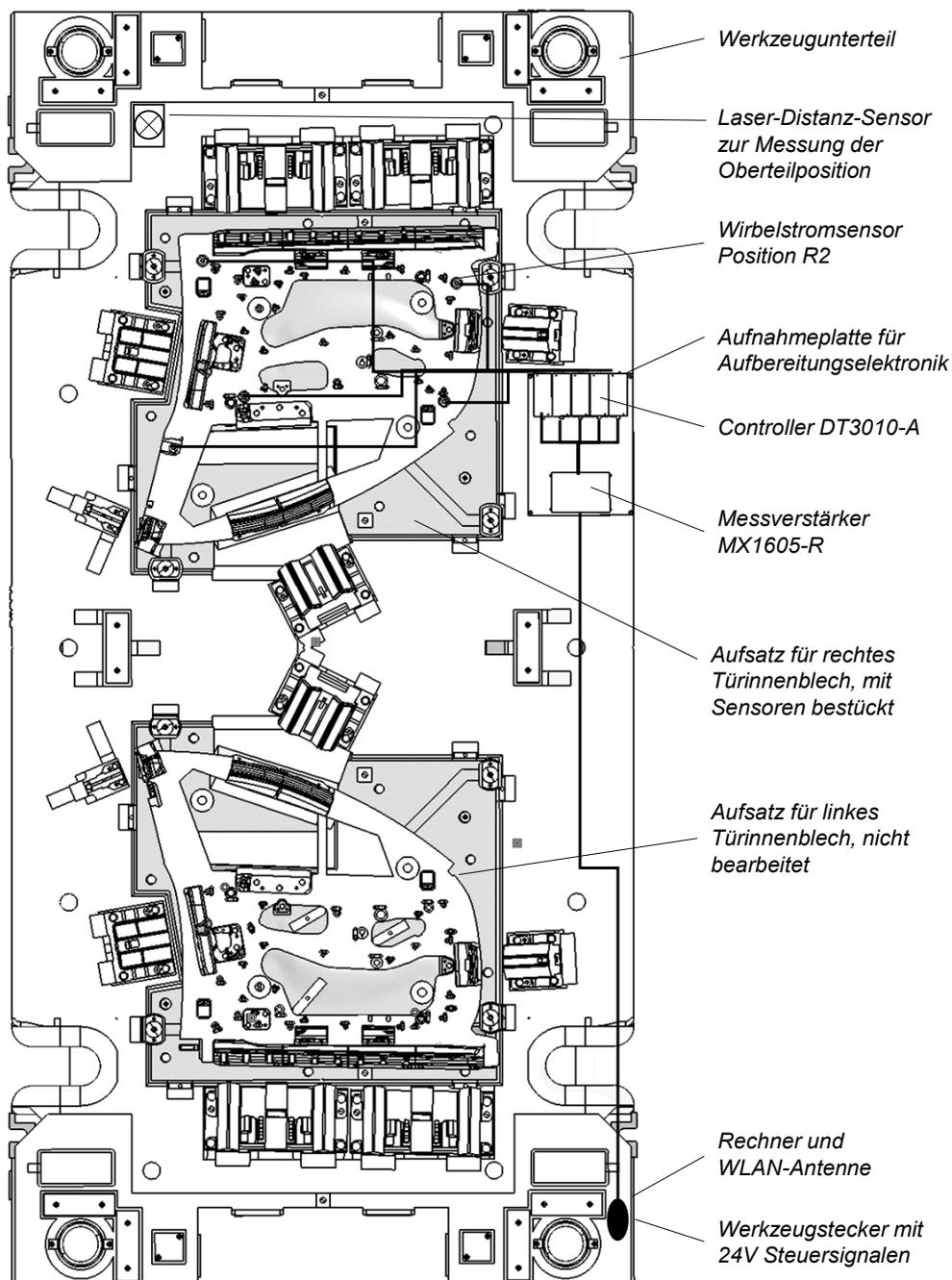


Abbildung 5.7: Messaufbau zur Erfassung der fünf Sensorsignale am Werkzeugunterteil

### 5.1.4 Berechnung der Bauteilverdrehung

Für die Berechnung der Bauteilverdrehung aus den fünf Sensormesswerten wird im ersten Schritt ein werkzeugspezifisches Koordinatensystem am Aufsatz definiert. Nach Abbildung 5.8 befindet sich dessen Ursprung an der Sensorposition  $R_2$ . Die Bauteil-Auflagefläche verläuft dort parallel zur Werkzeug-Bodenfläche. Ausgerichtet wird das Koordinatensystem entsprechend der Gusskanten des Gusskörpers, welche durch die Geraden  $a$ ,  $b$  und  $c$  gekennzeichnet sind. Innerhalb des Werkzeugkoordinatensystems  $W$  kann jede Sensorposition  $R_j$  bzw.  $G_i$  durch einen Vektor  $\vec{x}_{R_j}^W$  bzw.  $\vec{x}_{G_i}^W$  beschrieben werden:

$$\vec{x}_{R_j}^W = \begin{pmatrix} x_{R_j}^W \\ y_{R_j}^W \\ z_{R_j}^W \end{pmatrix}; \vec{x}_{G_i}^W = \begin{pmatrix} x_{G_i}^W \\ y_{G_i}^W \\ z_{G_i}^W \end{pmatrix} \quad (\text{Gl. 5.1})$$

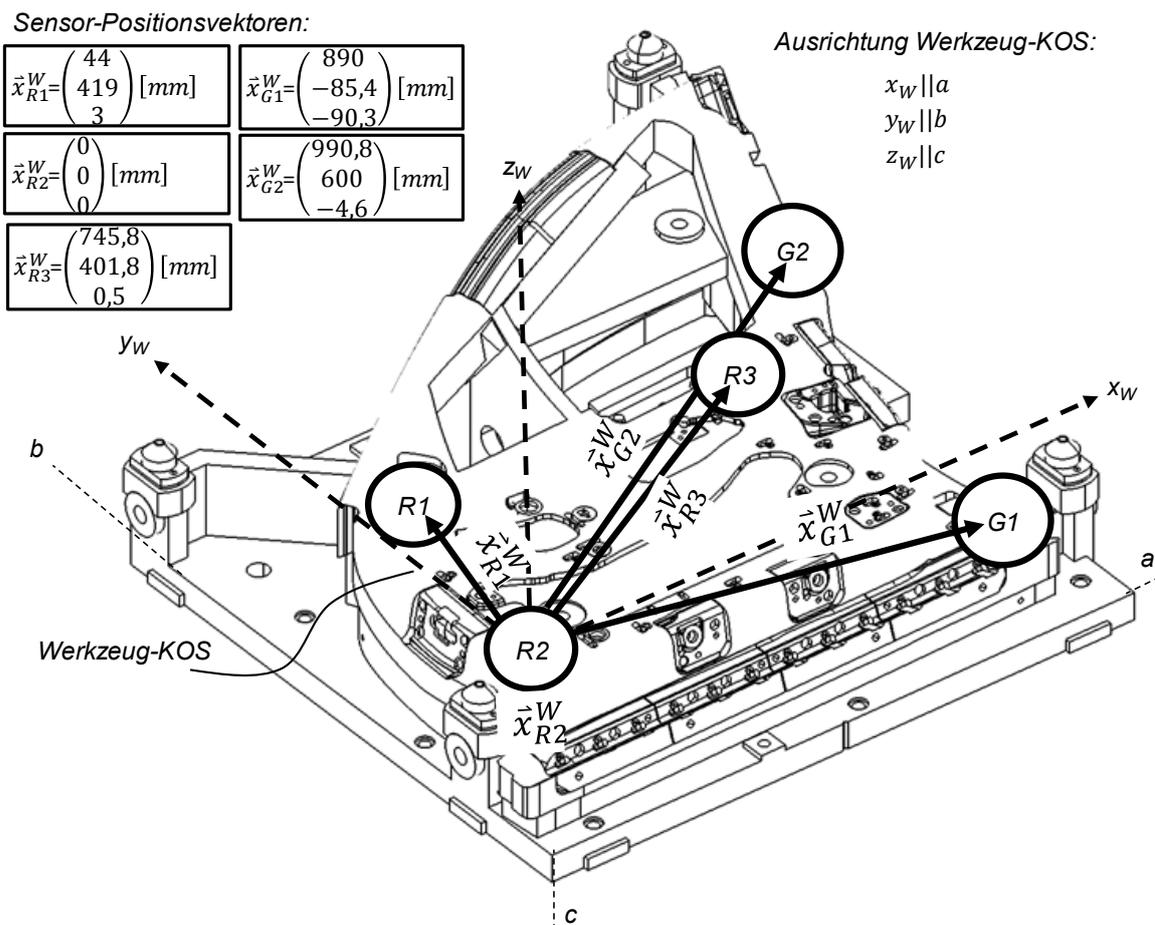


Abbildung 5.8: Definition des Werkzeugkoordinatensystems und der Sensor-Positionsvektoren am Werkzeugaufsatz

Jeder Wirbelstromsensor erfasst einen Referenz-Messpunkt  $\vec{r}_j$  oder Geometrie-Messpunkt  $\vec{g}_i$  am Bauteil entsprechend Abbildung 5.9. Im Werkzeugkoordinatensystem  $W$  können diese Punkte  $\vec{r}_j^W$  als Vektor jeweils aus der Summe des Sensor-Positionsvektors  $\vec{x}_{Rj}^W$  und eines Messergebnisvektors  $\vec{s}_{Rj}^W$  berechnet werden:

$$\vec{g}_i^W = \vec{x}_{Gi}^W + \vec{s}_{Gi}^W \quad (\text{Gl. 5.2})$$

$$\vec{r}_j^W = \vec{x}_{Rj}^W + \vec{s}_{Rj}^W \quad (\text{Gl. 5.3})$$

Um als skalares Abstands-Messergebnis den tatsächlichen Abstand zwischen Bauteil und Aufsatzfläche zu erhalten, muss die Einschraubtiefe des Sensors vom gemessenen Abstandswert abgezogen werden. Diese relativen Abstandswerte  $s_{Rj}$  bzw.  $s_{Gi}$  werden aus der Differenz der Abstandsmessungen zwischen offenem und geschlossenem Werkzeug für jeden Werkzeughub gebildet:

$$s_{Gi} = s_{Gi}^o - s_{Gi}^g \quad (\text{Gl. 5.4})$$

$$s_{Rj} = s_{Rj}^o - s_{Rj}^g \quad (\text{Gl. 5.5})$$

Im geschlossenen Zustand entspricht der skalare Sensormesswert  $s_{Rj}^g$  der Einschraubtiefe des Sensors. In Abhängigkeit der spezifischen Ausrichtung jedes Sensors im Raum können die Messergebnisvektoren  $\vec{s}_{Rj}^W$  aus den Skalaren  $s_{Rj}$  und den Ausrichtungswinkeln  $\alpha_{Rj}^W$  gebildet werden. Die Umwandlung der Messpunkte in das Bauteil-Koordinatensystem  $B$  erfolgt, individuell für jedes gemessene Bauteil, mit den drei Referenz-Messpunkten  $r_j^W$ . Ziel der Transformation ist ein ebenfalls in Abbildung 5.9 dargestelltes Koordinatensystem,

- dessen Ursprung im Messpunkt  $\vec{r}_2^B$  liegt,
- dessen y-Achse  $y_B$  den Messpunkt  $\vec{r}_1^B$  enthält,
- und der Messpunkt  $\vec{r}_3^B$  teil der x-y-Ebene ist.

Dieses Ziel wird durch die Verschiebung des Werkzeugkoordinatensystems um  $\vec{s}_{R2}^W$  und anschließender Drehung um alle Achsen realisiert. Die Transformationsvorschrift, um geometrische Masterpunkte  $\vec{g}_i^B$  zu berechnen, lautet:

$$\vec{g}_i^B = A_y(\phi)A_x(\xi)A_z(\psi)(\vec{g}_i^W - \vec{s}_{R2}^W) \quad (Gl. 5.6)$$

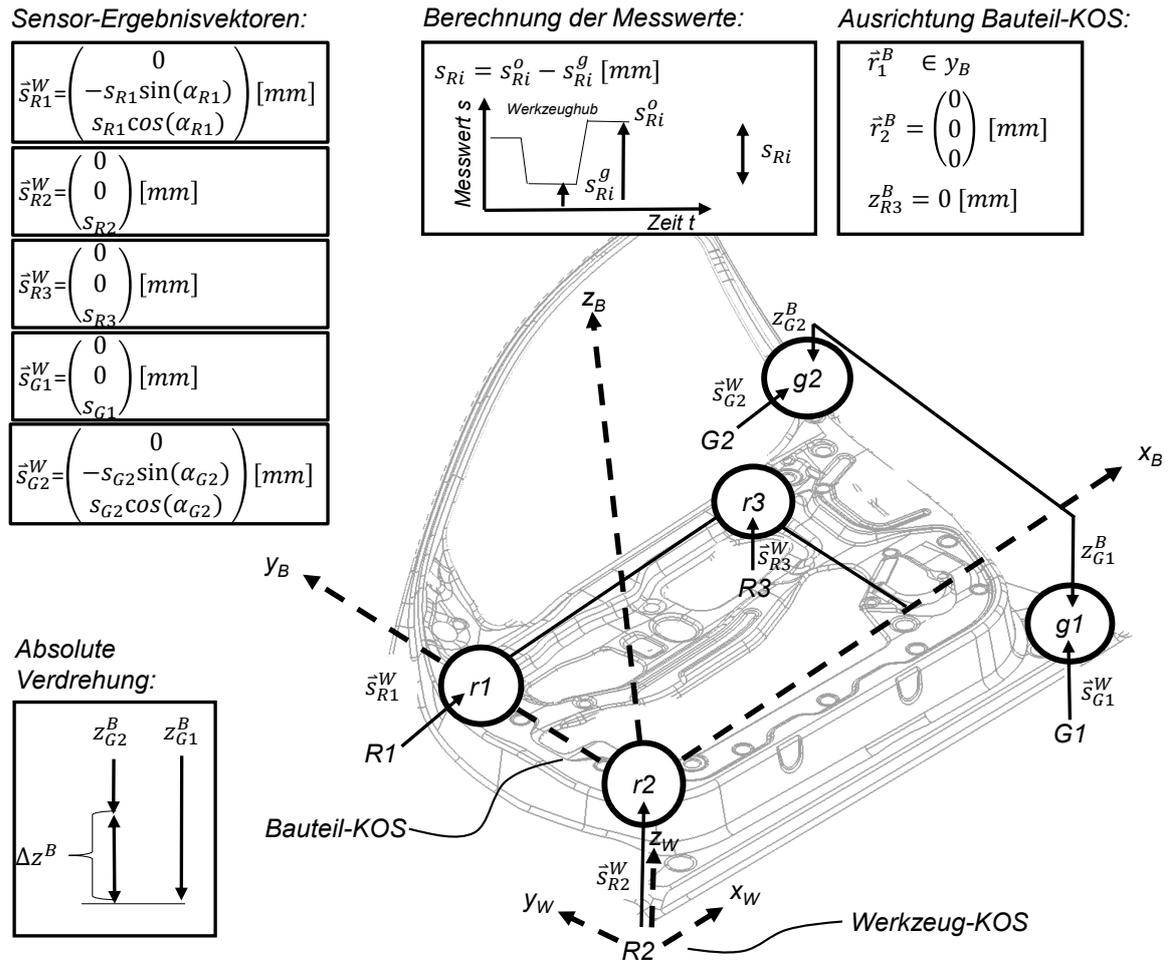


Abbildung 5.9: Definition des Werkzeugkoordinatensystems, der Sensor-Ergebnisvektoren und der absoluten Bauteilverdrehung

Dabei kann  $\vec{g}_i^W$  nach Gl. 5.2 auch aus der Summe seiner Positions- und Ergebnisvektoren dargestellt werden:

$$\vec{g}_i^B = A_y(\phi)A_x(\xi)A_z(\psi)(\vec{x}_{Gi}^W + \vec{s}_{Gi}^W - \vec{s}_{R2}^W) \quad (Gl. 5.7)$$

Die Winkel  $\phi$ ,  $\xi$  und  $\psi$  der Drehmatrizen  $A$  ergeben sich aus den Positions- und Ergebnisvek-

toren der Punkte  $r_i^W$ . Zuerst wird die z-Achse um den Winkel  $\psi$  und anschließend die x-Achse um  $\xi$  gedreht, sodass  $\vec{r}_1$  auf der y-Achse liegt. Anschließend wird die y-Achse um  $\phi$  gedreht, bis die z-Koordinate von  $\vec{r}_3$  zu Null wird.

Für jedes beliebig geformte Bauteil kann ein absolutes Geometriemaß  $\Delta z^B$  aus den z-Koordinaten der Punkte  $\vec{g}_1^B$  und  $\vec{g}_2^B$  berechnet werden. Die Bauteilverdrehung, also die Abweichung zur Sollgeometrie, wird aus der Differenz dieses absoluten Maßes aus offener und geschlossener Messung berechnet. Im geschlossenen Zustand deckt sich das Werkzeug- mit dem Bauteilkoordinatensystem, die Messpunkte  $\vec{g}_i$  entsprechen den Sensor-Positionsvektoren  $\vec{x}_i^W$ , da die Ergebnisvektoren zu Nullvektoren werden:

$$\text{Bauteilverdrehung} = \Delta z^B - \Delta z^W \quad (\text{Gl. 5.8})$$

$$\text{Bauteilverdrehung} = (z_{G2}^B - z_{G1}^B) - (z_{G2}^W - z_{G1}^W) \quad (\text{Gl. 5.9})$$

Durch Umstellen von Gl. 5.9 wird sichtbar, wie sich die Bauteilverdrehung aus den lokalen Maßabweichungen der Punkte G1 und G2 zusammensetzt:

$$\text{Bauteilverdrehung} = (z_{G2}^B - z_{G2}^W) + (z_{G1}^W - z_{G1}^B) \quad (\text{Gl. 5.10})$$

Der Einfluss der einzelnen Abstandsmessungen auf die berechnete Bauteilverdrehung wird in Abbildung 5.10 aufgezeigt. Die Veränderung der Referenz-Messpunkte  $R_1$  und  $R_2$  im Bereich des Scharniers führt zur größten betragsmäßigen Änderung der Bauteilverdrehung. Kleine Veränderungen in diesen Messpunkten bewirken aufgrund ihres Hebels gegenüber den Geometrie-Messpunkten große Änderungen in der Bauteilverdrehung.

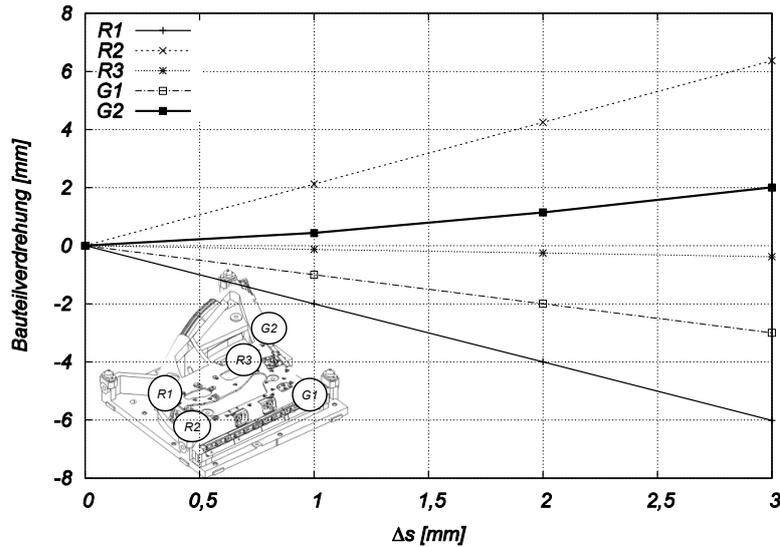


Abbildung 5.10: Einfluss der Einzel-Messwerte auf die berechnete Bauteilverdrehung

Mit der verbauten Messtechnik wird für jedes produzierte Bauteil eine Textdatei erzeugt, welche jeweils die Abstands-Messwerte der fünf Sensoren für den Zeitraum vom Niederhalter-Aufsetzen bis zur Bauteil-Entspannung enthält. Aus dieser Textdatei werden die skalaren Abstandswerte  $s_{R_j}^g$  und  $s_{R_j}^o$  ausgelesen und mit ihnen die relativen Abständen  $s_{R_j}$  nach Gl. 5.5 berechnet. Diese bilden die Einträge der Referenz-Messpunkte  $\vec{r}_i^W$ , aus denen die Winkel  $\phi$ ,  $\xi$  und  $\psi$  für die Koordinatentransformation nach  $B$  bestimmt werden. In  $B$  wird die Differenz der z-Koordinaten der Geometrie-Messpunkte im Verhältnis zur Soll-Differenz als Bauteilverdrehung bezeichnet. Die Soll-Differenz des hier betrachteten Türinnenbleches beträgt  $85,7 \text{ mm}$ . Auf diese Weise wird eine Bauteilverdrehung für jedes Bauteil berechnet, welche mit der Visualisierung aus Kap. 5.3 in Echtzeit an der Presse ausgegeben wird.

## 5.2 Überwachung des Einlaufweges in Nachfolgewerkzeugen

### 5.2.1 Grundkonzept

Die Messung des Platineneinlaufs am Flansch ist für komplexe Bauteile, wie Türinnenbleche, nur am Ziehteil möglich. Meist werden schon im zweiten Bearbeitungsschritt die Flanscbereiche zusammen mit der Information des Flanscheinzuges abgetrennt. Durch das Aufbringen von Markierungen auf die Platine, beispielsweise mittels Laserbeschriftung innerhalb von Coilanlagen, kann eine Messung in Nachfolgewerkzeugen erfolgen. Die aufgebrachten Markierungen, wie z.B. Kreuze oder Kreise, wandern während des Umformens in Bauteilbereiche, die am Fertigteil noch sichtbar sind. Je nach Materialfluss wandern die Markierungen auf andere Endpositionen, sodass eine Aussage über den Umformprozess getroffen werden kann. Sensorkameras

könnten für jedes produzierte Bauteil Bilder relevanter Bauteilbereiche aufnehmen und mittels Bildverarbeitung die Position der Markierungen identifizieren.

Problematisch bei dieser Herangehensweise sind die auftretenden Ungenauigkeiten bei der Platinenherstellung. Die Coilbreite schwankt innerhalb weniger Millimeter. Ebenfalls können Einlegeungenauigkeiten der Platine im Ziehwerkzeug das Messergebnis verfälschen. Im Serienbetrieb muss darüber hinaus eine prozesssichere Beschriftung aufrechterhalten werden. Für eine Beschriftung spricht jedoch die hohe Flexibilität bei der Gestaltung und Positionierung der Markierungen an der Platine. Um den Aufwand sowie mögliche Ungenauigkeiten einer Laserbeschriftung zu vermeiden, wurde ein anderer Ansatz in dieser Arbeit gewählt.

Die aus den FEM-basierten Sensitivitätsanalysen ermittelten Einlaufweg-Masterpunkte am Türinnenblech sollen mittels Sensorkameras im Nachfolgewerkzeug erfasst werden. Dies geschieht über die Detektion der Anhaukante in den Bereichen Scharnier und Schloss mit einem Kamerasystem entsprechend Abbildung 5.11.

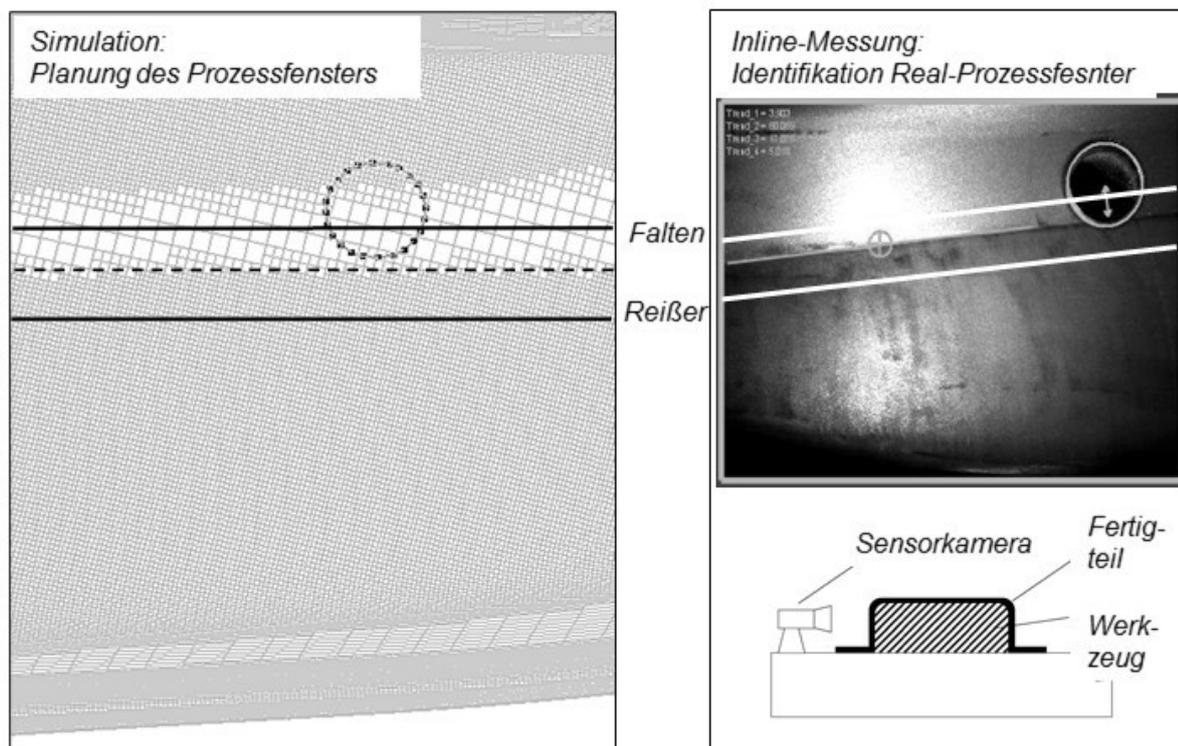


Abbildung 5.11: Verwendung der Anhaukante als durchgängige Messgröße von der Planung zum Serienprozess

Die Kamera soll für jedes produzierte Bauteil ein Bild aufnehmen und die Lage der Anhaukante aus dem Bild berechnen. Die Anhaukante wird durch die Radien des Werkzeuges aufgebracht, relativ zur Bauteilgeometrie unterliegt sie somit keinen Positionsungenauigkeiten. Da sie heute

standardmäßig als Simulationsergebnis ausgewertet werden kann, ergibt sich in der Planung kein Zusatzaufwand durch die Festlegung von Platinenmarkierungen. Die Anhaulante ist somit eine durchgängige, fehlerarme Messgröße des Umformprozesses. Bisher ist nicht bekannt, ob diese durch optische Systeme zuverlässig im Serienprozess erfasst werden kann. Zur Klärung dieser Fragestellung wird im ersten Schritt ein solches Messsystem aufgebaut.

### 5.2.2 Auswahl der Sensorkameras

Abbildung 5.12 zeigt beispielhaft einen Versuchsaufbau im Labor und am Nachfolgewerkzeug mit der Kamera Insight 7200 der Cognex Corporation. Während im Labor die Erfassbarkeit der Anhaulante nachgewiesen wurde, konnten am realen Werkzeug geeignete Systemkomponenten, wie Objektiv und Beleuchtung, für den speziellen Anwendungsfall ausgewählt werden. Eine Übersicht der eingesetzten Komponenten befindet sich im Anhang (Tabelle A.1).

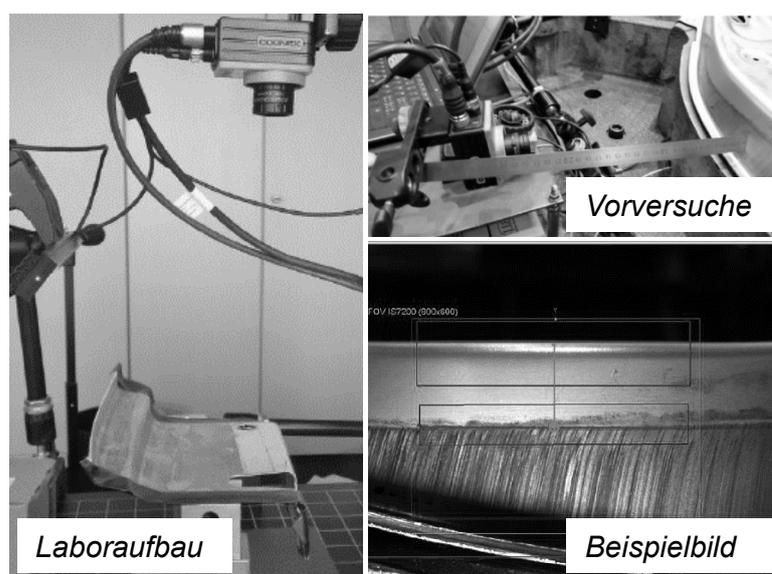


Abbildung 5.12: Vorversuche im Labor und am Werkzeug

Auf Basis der Voruntersuchungen am Werkzeug wurde für die Sensorkamera ein Objektiv mit 12 mm Brennweite und festem Fokus ausgewählt. Erschütterungen können somit nicht zur ungewollten Verstellung des Fokus führen. Bei einem Abstand von etwa 300 mm ergibt sich durch dieses Objektiv ein Sichtfenster in der Größe von ca. 10 cm x 7,5 cm bei einer Auflösung von 800 x 600 Pixel. Die Kantenlänge eines Pixels beträgt somit etwa 1/8 Millimeter. Schätzungsweise umfasst die Genauigkeit der subpixelgenauen Kantendetektion im Feldeinsatz ein Fünftel der Pixelgröße. Somit sind Genauigkeiten von ca. 0,015 mm zur Detektion der Anhaulante zu erwarten. Aus der Analyse des Umformprozesses bekannt ist die Schwankung der

Anhaukantenposition in der Größenordnung von mehreren Millimetern. Zur Aufnahme dieser Änderungen reicht die Genauigkeit der ausgewählten Sensorkamera deutlich aus.

Zur Belichtung dient eine Rotlicht-LED Matrix, welche schräg auf den Auswertungsbereich gerichtet ist. Reflektionen der Bauteiloberfläche führen dadurch nicht zur Überbelichtung bei der Bildaufnahme. Die Belichtungszeit muss für jeden Bereich spezifisch, am besten während der Produktion in der Pressenumgebung, angepasst werden.

### 5.2.3 Integration der Sensorkameras

Die Systemkomponenten sind mittels Normprofilen mit dem Werkzeugunterteil verbunden. Bei der Montage müssen die Verfahrswege der Schieberwerkzeuge und die Transportwege des Bauteils in der Presse berücksichtigt werden. Die Gesamthöhe der Kamerasysteme wurde so gewählt, dass diese nicht höher als die Kegeldistanzen am Unterteil ist. Somit wird der Teiletransport nicht behindert. Abbildung 5.13 zeigt den Aufbau im Bereich des Schlosses am Nachfolgewerkzeug AFO35.

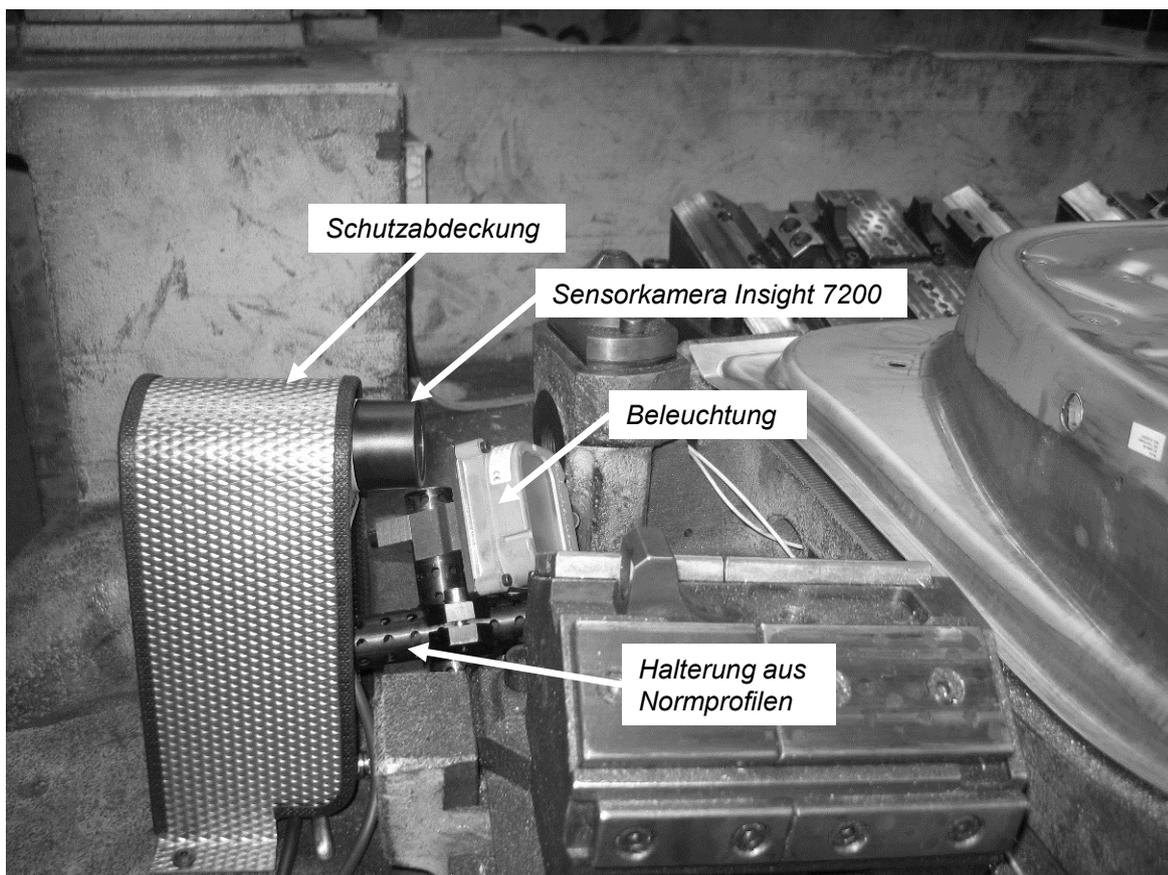
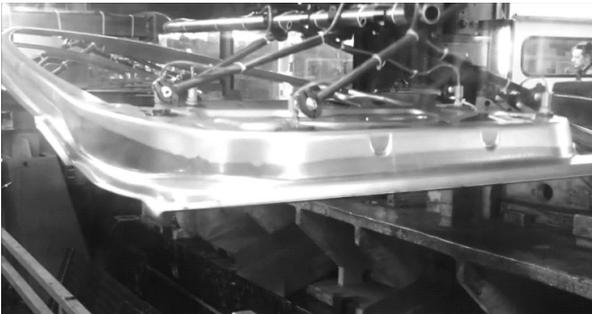


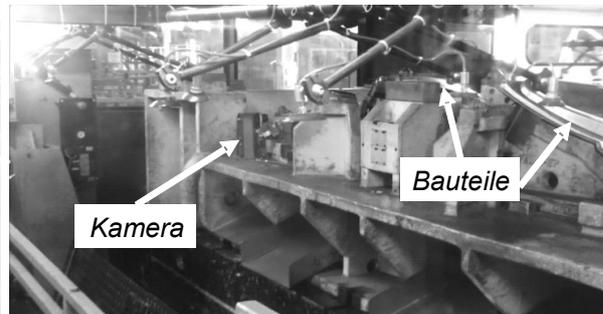
Abbildung 5.13: Aufbau des Kamerasystems zur Überwachung des Schlossbereichs am Werkzeug

Abbildung 5.14 veranschaulicht den Messzyklus für einen gesamten Pressenhub. Ein Feeder transportiert das Bauteil vom vorgeschalteten Werkzeug zum messenden Nachfolgewerkzeug und legt es dort ab. Anschließend schließt die Presse, das Werkzeug führt die Bearbeitungsoperationen am Bauteil durch. Mithilfe der Maschinensteuerung wird, in Abhängigkeit des Kurbelwinkels, ein 24 V Steuersignal an die Kamera gesendet. Dieses löst die Bildaufnahme aus. Die Belichtung wird von der Kamera gesteuert. Nach erfolgreicher Bildverarbeitung schickt die Kamera per File Transfer Protocol (FTP) eine Text-Datei mit den ermittelten Messwerten an die werkzeugintegrierte Recheneinheit. Auf dieser ist die Software Insight Explorer der Cognex Corporation aktiviert. Sie arbeitet als FTP-Server der Kameras im Netzwerk. Analog zur Geometriemessung werden die ankommenden Textdateien mittels der Visualisierung aus Kap. 5.3 dargestellt.

I) Feeder bringt Bauteil



II) Bauteil eingelegt



III) Bearbeitungsschritt



IV) Bildaufnahme



Abbildung 5.14: Ablauf eines Werkzeughubes und Bildaufnahme nach Öffnen des Werkzeuges

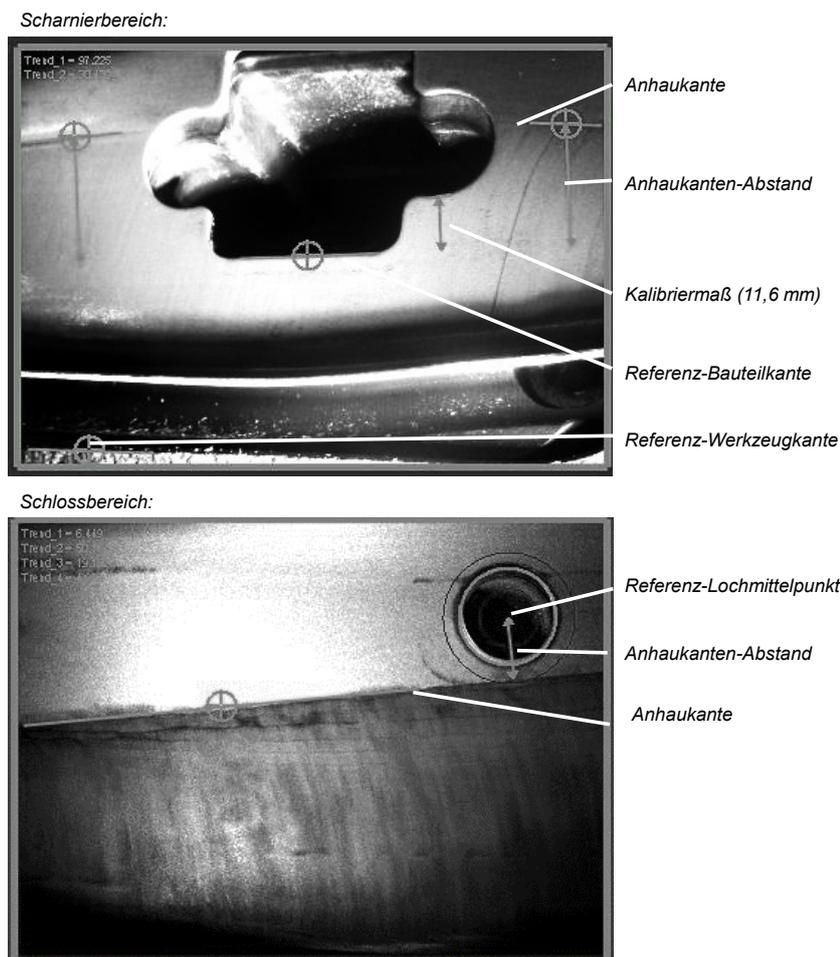
Bisher wurden die eingesetzten Komponenten sowie deren Ansteuerung und Datenverarbeitung beschrieben. Das Herzstück der Anhauskantendetektion bildet die Auswertung der aufgenommenen Bilder. Diese wird im nächsten Abschnitt erläutert.

#### 5.2.4 Berechnung der Anhauskantenposition

Vor dem eigentlichen Serieneinsatz des Messsystems müssen die Kameras programmiert werden. Mithilfe der am Rechner installierten Software, wird die Vorgehensweise zur Bildverarbei-

tung bei jeder Kamera eingestellt. Diese sogenannten Jobs werden direkt auf der Kamera gespeichert und starten, sobald sie durch das Verbinden des Werkzeugsteckers eingeschaltet wird. Zur Verfügung stehen zahlreiche vorgefertigte Algorithmen, wie beispielsweise die Erkennung von Mustern oder die Anwendung von Filtermethoden. Nachfolgend beschrieben wird, welche Methoden zur Analyse des Versuchsbauteils ausgewählt wurden.

In den beiden Bauteilbereichen werden neben der Anhaulante andere Geometrieelemente von der Kamera erkannt. So wird im Schlossbereich ein Loch mit einem Durchmesser von 20 mm detektiert. Im Scharnierbereich kann die Unterkante am Scharnierausschnitt erfasst werden. Diese Elemente ermöglichen die Kompensation von Fehlern aus der Bauteilverschiebung, indem die Lage der Anhaulante relativ zu diesen Elementen erfasst wird. Entsprechend Abbildung 5.15 wird die Lage der Anhaulante als Abstand zum entsprechenden Referenzelement ausgewertet.



*Abbildung 5.15: Auswertung der Anhaulantenpositionen in den Bauteilbereichen Scharnier und Schloss mittels Bildverarbeitung*

Ebenso erfolgt die Kalibrierung, also die Umrechnung zwischen Pixeln und Millimetern, durch

diese Elemente. Am Scharnier dient der Abstand zwischen zwei Ausschnittkanten von 11,6 mm zur Umrechnung, während im Schlossbereich der Lochdurchmesser verwendet wird. Für jedes produzierte Bauteil und Bild kann dieser Kalibrierungsschritt durchgeführt werden, dadurch können mögliche Kameraverschiebungen und daraus resultierende Ungenauigkeiten vermindert werden. Im Scharnier-Bild ist zudem eine starre Werkzeugkante sichtbar. Die Detektion dieser Kante dient später zur Bewertung der Wiederholgenauigkeit im Serienbetrieb, da sich ihre absolute Position nicht verändern darf.

Insgesamt werden nur einfache Standard-Algorithmen zu Erkennung der Anhauskante eingesetzt. Im Sinne eines späteren Presswerkseinsatzes und der Bedienung durch Instandhaltungskräfte ist dies ein wichtiger Aspekt. Selbsterzeugte Auswertungsmethoden erfordern ein umfangreiches Verständnis der Systemfunktion, während die Anwendung von Standardmethoden vergleichsweise einfach erlernt werden kann.

### **5.3 Visualisierung der Messergebnisse**

Um die Ergebnisse des Systems dem Maschinenführer während der Produktion sichtbar zu machen, wurde mittels Visual Basic eine grafische Oberfläche programmiert. Für jeden Pressenhub werden bauteilspezifische Textdateien vom System erstellt und per WLAN in einen Zielordner verschoben. Dieser Zielordner wird von der Software überwacht. Jede neu abgelegte Datei wird erkannt und ihr Inhalt ausgelesen.

Abbildung 5.16 zeigt die Oberfläche der Visualisierungssoftware. Registerkarten unterteilen verschiedene Ansichtsfenster, für den Produktionsbetrieb wurde ein Übersichtsfenster mit allen Messergebnissen erstellt. Weiterhin können Einzelmesswerte und Referenzmessungen über andere Registerkarten abgerufen werden (vgl. Abbildung A.4 und Abbildung A.5). Ein interner Timer erfasst die Zeit seit der letzten Dateiablage. Nach zwei Stunden werden die Dateien im Zielordner in eine .csv-Datei zusammengefasst und der Zielordner geleert. Somit erfolgt eine automatische Archivierung nach jeder Abpressung.

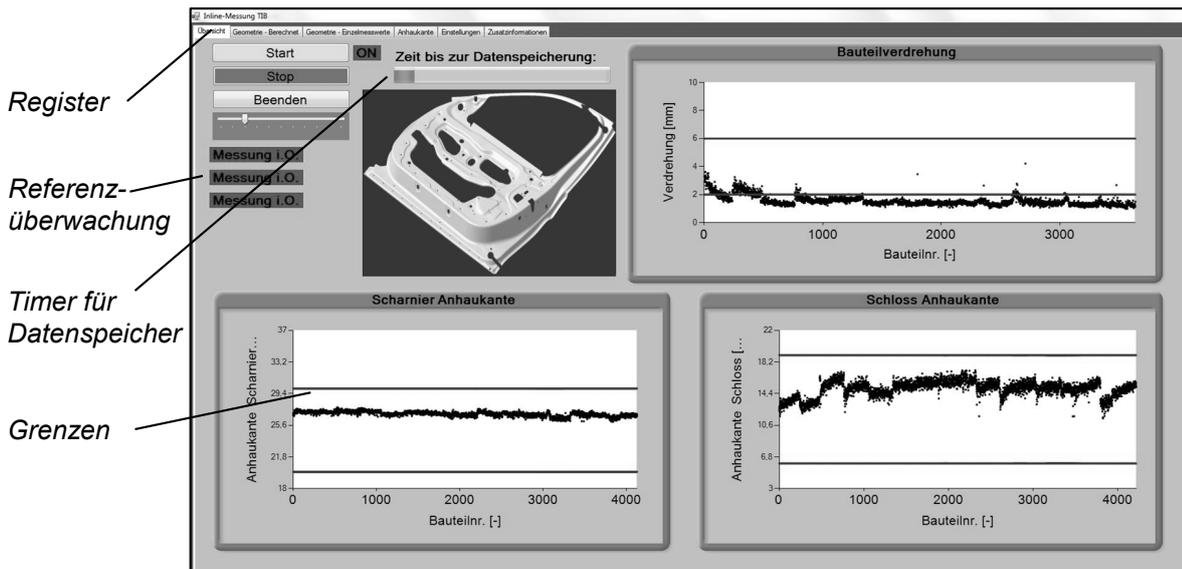


Abbildung 5.16: Mittels Visual Basic programmierte Visualisierungsoberfläche zur Darstellung der Messergebnisse für jeden Pressenhub während der Produktion

Im Übersichtsfenster wird der Status der Referenzmessung überwacht. Solange diese innerhalb einer eingestellten Toleranz liegt, leuchtet die Anzeige grün. In Absprache mit Produktionsverantwortlichen können außerdem Grenzen in den Diagrammen festgelegt werden. Im Falle der Einlaufwegmessung entsprechen diese Grenzen der Reiße- und Faltegrenze. In Zusammenarbeit mit dem Karosseriebau können außerdem sinnvolle Grenzen für die Geometriemessung definiert werden.

## 6 Validierung des Pilotsystems im Serienbetrieb

Das am Nachfolgewerkzeug der AFO35 realisierte Pilotsystem wird im Serienbetrieb eingesetzt. Somit werden für jedes produzierte Bauteil Informationen bezüglich dessen Geometrie und Anbauanteile generiert. Zunächst sollen diese Bauteilinformationen in Bezug auf Plausibilität und Genauigkeit überprüft werden. Diese System-Validierung geschieht unter Anwendung nachfolgender Methoden:

- **Auswertung fester Referenzwerte:** Durch die zusätzliche Auswertung konstanter Größen, wie die Position starrer Werkzeugkanten, können Vibrations- oder Erschütterungseinflüsse im Serienbetrieb abgeschätzt werden.
- **Erfassbarkeit von Prozessschwankungen:** Kontrollierte oder unkontrollierte Prozessschwankungen müssen vom System aufgezeichnet werden. So sollten beispielsweise Änderungen der Blechhalterkraft und deren Einfluss auf die gemessenen Informationen sichtbar sein.
- **Vergleichsmessungen:** Durchführung stichprobenartiger Vergleichsmessungen, z.B. im Messraum, zur Bewertung der Richtigkeit der generierten Bauteilinformationen.

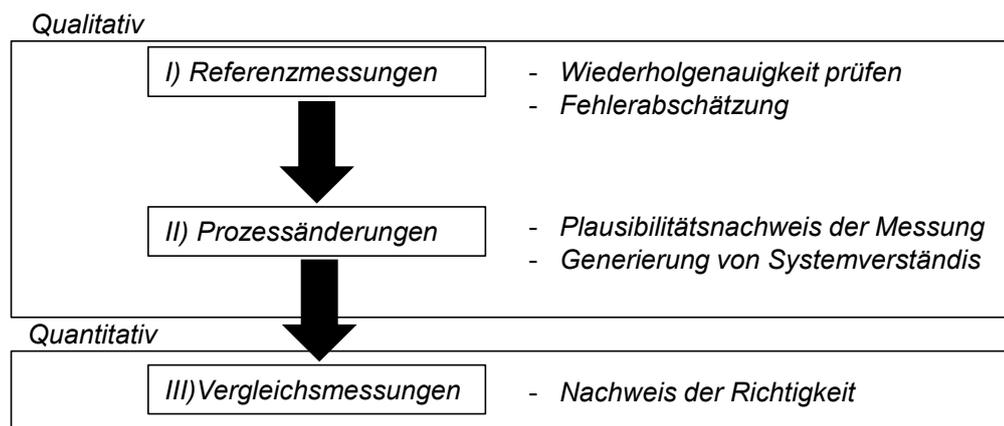


Abbildung 6.1: Vorgehensweise zur Validierung des Pilotsystems im Serieneinsatz

Diese Methoden werden an den beiden entwickelten Messkonzepten, beginnend mit der Inline-Geometriemessung, getrennt betrachtet. Abschließend erfolgt ein Vergleich dieser Systeme untereinander.

## 6.1 Messgenauigkeit der Geometriemessung

### 6.1.1 Analyse der Wiederholgenauigkeit

Die Analyse der Wiederholgenauigkeit der Inline-Geometriemessung geschieht in diesem Abschnitt auf zwei unterschiedliche Arten. Zuerst wird die Wiederholgenauigkeit der einzelnen Sensoren („Sensorfähigkeit“) während einer Serienabpressung durch die Erfassung eines festen Referenzabstandes bewertet. Anschließend wird die Genauigkeit des Gesamtsystems („Systemfähigkeit“) zur Erfassung der Bauteilverdrehung durch mehrfaches Einlegen und Messen des gleichen Bauteils analysiert.

#### Bewertung der Sensorfähigkeit im Serienbetrieb

Während eines Werkzeughubes können Abstandssignale zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen werden. Abbildung 6.2 stellt die Abstandsmessung von Sensor  $R2$  für einen Hub dar. Zuerst wird das Bauteil eingelegt (I) und vom Abstandssensor erfasst, bis der Niederhalter aufsetzt (II). Solange der Niederhalter aufliegt, wird jedes Bauteil durch die Niederhalterkraft auf den Aufsatz gedrückt und elastisch verformt (III). Die Bauteile nehmen dabei kurzzeitig ihre Sollgeometrie an. Anschließend hebt der Niederhalter wieder ab (IV). Ein Laser-Distanz-Sensor misst die Position des Oberteils und liefert Messsignale (Trigger) von 4 bis 20 mA für Abstände von 6 bis 0,2 m. Im unteren Umkehrpunkt gibt er ein Signal von 19,7 mA aus. Die Aufnahme der, zur Berechnung der Bauteilverdrehung verwendeten, skalaren Abstandswerte  $s_{Rj}^g$  und  $s_{Rj}^o$  beginnt beim positiven Durchschreiten des Trigger-Signals von 19,5 mA, kurz bevor das Oberteil den unteren Totpunkt erreicht. Beendet wird die Messung beim negativen Durchschreiten von 18,5 mA, nachdem sich das Bauteil entspannt hat.

Die hohe Messfrequenz der Wirbelstromsensoren, hier 19 kHz, ermöglicht die Aufnahme des Bauteilverhaltens zwischen den einzelnen Phasen. So ist ersichtlich, dass nach dem ersten Kontakt des Niederhalters (II) das Bauteil um ca. 2 mm nach unten gedrückt wird. Anschließend bewegt das Bauteil sich an dieser Position vergleichsweise schnell, für kurze Zeit nach oben und anschließend wieder nach unten. Ähnliche Bewegungsmuster können auch nach Phase III, während des Abhebens des Niederhalters, identifiziert werden. Dieses Verhalten ist dem ungleichmäßigen Kontakt des Niederhalters mit dem Bauteil geschuldet, außerdem ist der Niederhalter im Oberteil nicht ideal geführt sondern weist stets ein Führungsspiel auf. Für die Inline-Geometriemessung ist dieses Bauteilverhalten beim Schließen nicht relevant. Jedoch darf der Niederhalter das Bauteil während des Hochfahrens nicht aus dem Aufsatz abheben. Ebenso darf sich das Bauteil nicht mit dem Aufsatz verspannen.

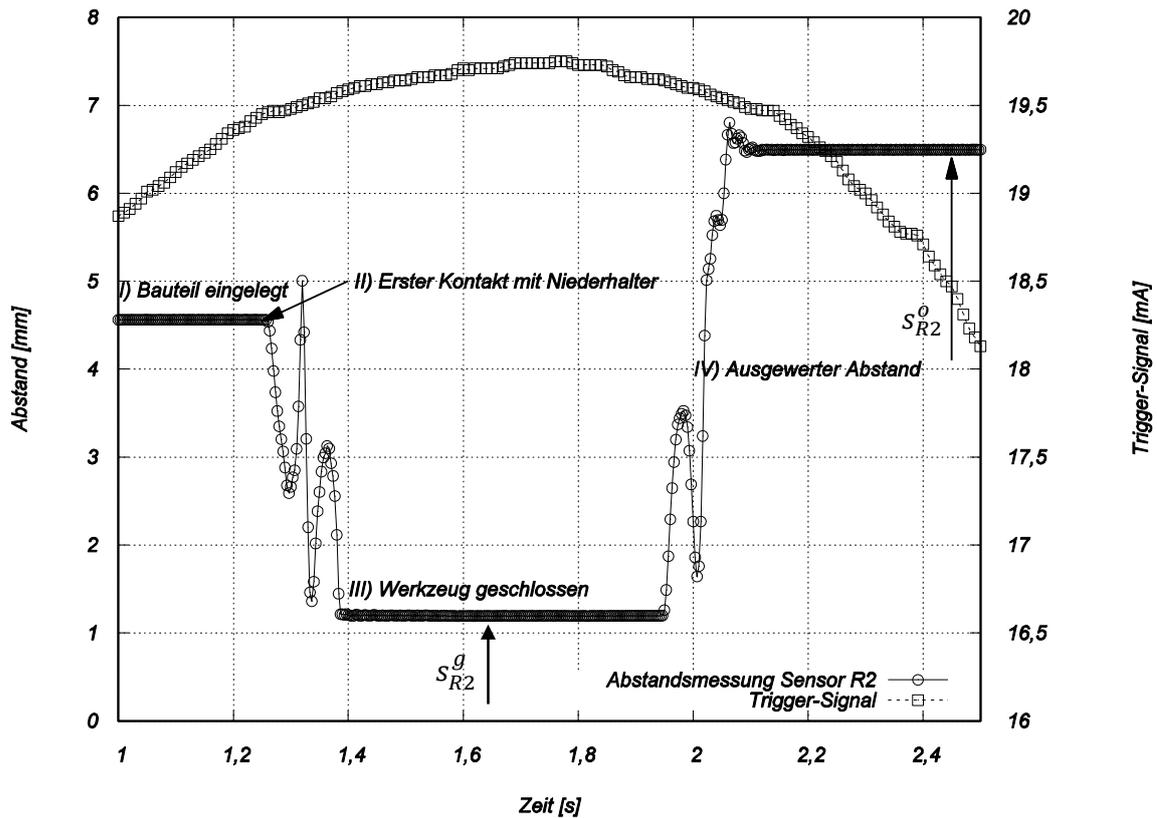


Abbildung 6.2: Messung des Abstandes zum Bauteil am Sensor R2 und Trigger-Signal während eines beispielhaften Werkzeughubes

Eine Messung des Abstandes während der Phase III, wenn der Niederhalter aufliegt, ermöglicht die Bewertung der Wiederholgenauigkeit der einzelnen Sensoren. Da alle Bauteile auf den Aufsatz gedrückt und elastisch deformiert werden, sollte ein konstanter, bauteilunabhängiger aber positionsabhängiger Referenzwert messbar sein. Dieser Referenzabstand  $s_{Rj}^g$  bzw.  $s_{Gi}^g$  kann für eine gesamte Abpressung von mehreren tausend Bauteilen aufgezeichnet werden, wie in Abbildung 6.4. Beispielhaft zeigt sie den gemessenen Abstand von Sensor R3 aus den Phasen III und IV für eine Abpressung von 3600 Bauteilen. Der geschlossene Abstandswert  $s_{R3}^g$  weist während der Abpressung kein kontinuierliches Abdriften vom Mittelwert  $0,87 \text{ mm}$  auf. Außerdem traten keine Ausreißer oder Fehlmessungen auf. Im Vergleich zu den Referenzmessungen unterliegen die offenen Abstandswerte  $s_{R3}^o$  einer größeren Streuung. Sie bewegen sich für die betrachtete Abpressung zwischen etwa  $4$  und  $5 \text{ mm}$ . Zudem sind sowohl kontinuierliche, als auch sprunghafte Veränderungen ihres mittleren Prozessverlaufes ersichtlich. Eine sprunghafte Veränderung tritt beispielsweise bei Bauteilnummer 2750 auf. Der Referenzwert verläuft unverändert. Dies ist ein erster Indikator für die Erfassbarkeit von geometrischen Schwankungen durch das entwickelte Messkonzept. Würde das Bauteil sich infolge der Einwirkung des Niederhalters mit dem Aufsatz verspannen, so sollten die im offenen Zustand gemessenen Abstandswerte keine

deutlichen Veränderungen aufzeigen.

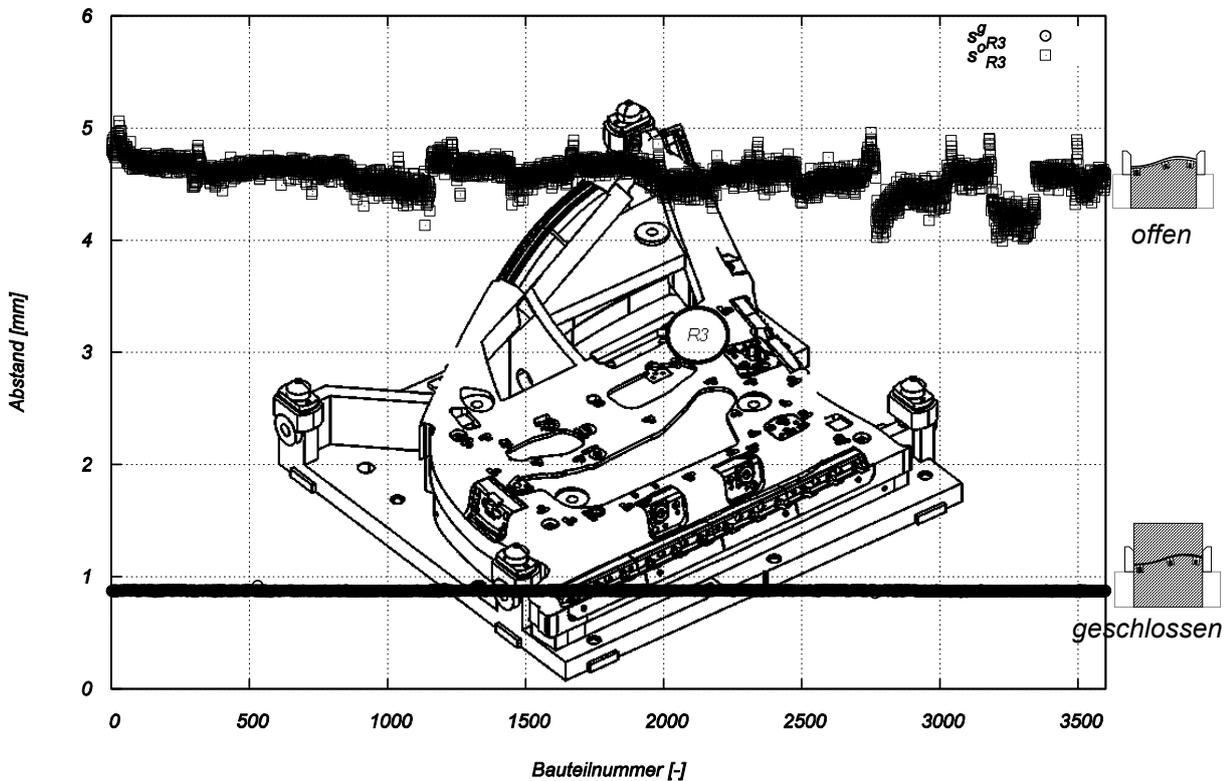


Abbildung 6.3: Gegenüberstellung der gemessenen Abstände bei offenem (IV) und geschlossenem Werkzeug (III) an Position R3 für 3600 produzierte Bauteile

Über die Standardabweichung dieser Referenzabstände  $s_{R_j}^g$  kann ein mittlerer Messfehler der einzelnen Sensoren berechnet werden. Abbildung 6.4 stellt diese mittleren Fehler der fünf Sensorposition gegenüber, welche zwischen 1 und 10 tausendstel Millimeter betragen. Während die Standardabweichung an Position R1 knapp größer als 0,001 mm ist, zeigt sich die größte Streuung an der Position G1 mit mehr als 0,009 mm. Eine Erklärung für diese Unterschiede liegt im Funktionsprinzip der Wirbelstromsensoren begründet. Das lokale Gefüge des Bauteils beeinflusst das Messergebnis des Sensors, Chargenschwankungen führen somit trotz gleichen Abstandes von Bauteil zu Sensor zu kleinen, positionsabhängigen Messfehlern. Ferner besteht die Vermutung, dass über die Auswertung des Referenzabstandes ein Zusammenhang mit der lokalen Verfestigung des Materials hergestellt werden kann.

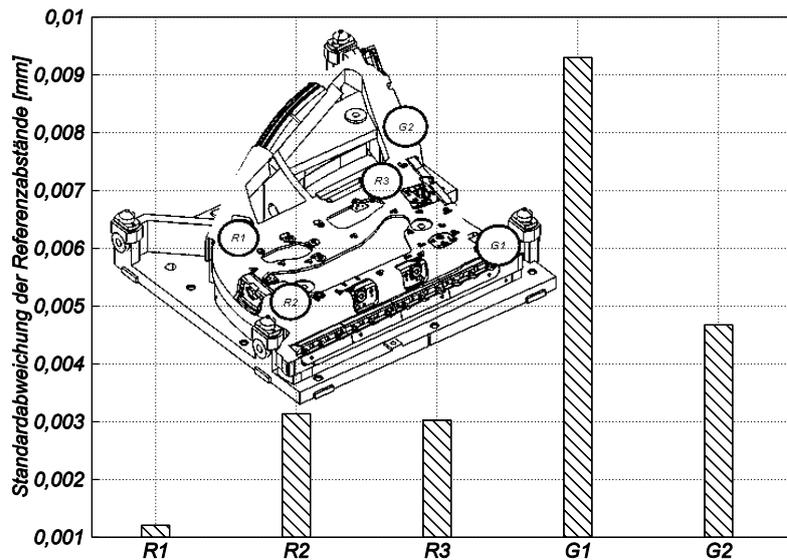


Abbildung 6.4: *Mittlerer Fehler der fünf Referenzabstände für 3600 Bauteile, gemessen während einer regulären Serienabpressung*

Sämtliche berechneten Streuungen der Referenzabstände sind im Vergleich zum erwarteten Rücksprungverhalten des Bauteils im Produktionsprozess vernachlässigbar klein. Dieses umfasst Bauteilverdrehungen über mehrere Millimeter, wie die Analyse der Serienmessungen im Messraum zeigte. Im ersten Schritt konnte somit nachgewiesen werden, dass alle fünf Sensoren fähig sind, wiederholgenaue Werte in der rauen Produktionsumgebung zu generieren.

Für die Überwachung der Sensorfähigkeit im laufenden Serienbetrieb ist diese Referenzmessung aber von weiterer Bedeutung. Über viele Abpressungen und Monate hinweg können diese Referenzabstände kontrolliert werden. Fehler infolge des Lockerns von Sensoren, Temperatureinflüsse oder Beschädigungen können dadurch erkannt und gegebenenfalls korrigiert werden. Für das hier umgesetzte Pilotsystem ist ein solcher Vergleich in der Abbildung 6.5 dargestellt. Gegenübergestellt sind die Mittelwerte der fünf Referenzabstände aus zwei Abpressungen, welche zeitlich mehr als 6 Monate getrennt sind. In diesem Zeitraum wurden mehr als 350000 Bauteile in Doppelteilmontage mit diesem Werkzeug hergestellt. Obwohl keine Wartungen oder Korrekturen an den Sensoren durchgeführt wurden, beträgt der Unterschied zwischen den Referenzwerten weniger als 0,01 mm. Dieses Beispiel unterstützt die Eignung von Wirbelstromsensoren für den Einsatz im rauen Presswerksumfeld.

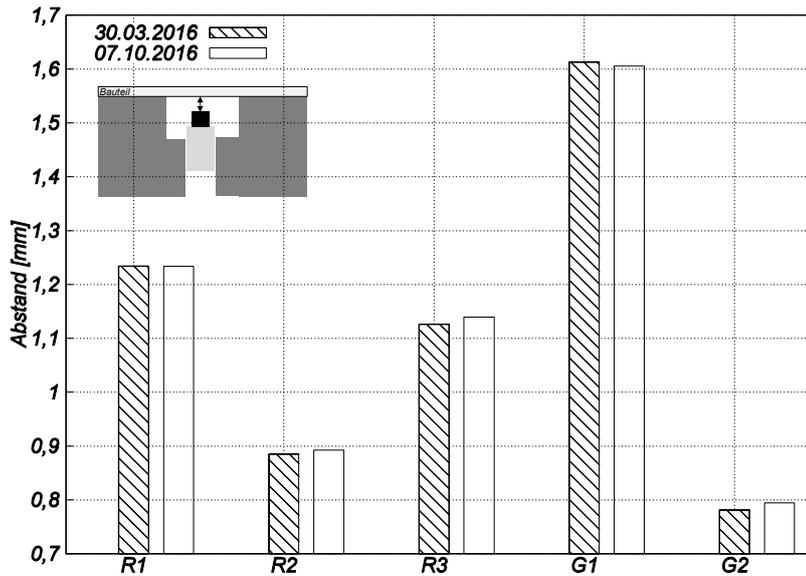


Abbildung 6.5: Vergleich der mittleren Referenzabstände nach einem Einsatzzeitraum von sechs Monaten

Neben der Referenzmessungen an vielen Bauteilen kann die Messgenauigkeit dieses Konzeptes anhand von Wiederholmessungen an einem Bauteil untersucht werden.

### Bewertung der Systemfähigkeit im Offlinebetrieb

Im Werkzeug der AFO35 werden zahlreiche Trennoperation ausgeführt. Ein wiederholtes Einlegen des Bauteils mit anschließendem Werkzeughub darf aufgrund der Gefahr der Werkzeugbeschädigung nicht geschehen. Geringe Positionsfehler des bereits beschnittenen Bauteils am Werkzeugaufsatz könnten zur Beschädigung von Schneidstempeln führen. Die bereits gestanzten, leicht verschobenen Löcher am Bauteil verursachen ein Verlaufen des Schneidstempels. Dieser Sachverhalt ist ein wesentliches Problem bei der Bewertung der Systemfähigkeit. Weder im Produktionsbetrieb, noch Offline darf das Werkzeug mit eingebauten Schneidstempeln mehrfach mit dem gleichen Bauteil geschlossen werden. Um die Wiederholgenauigkeit trotzdem abschätzen zu können, wurden Bauteile manuell ins Werkzeug gelegt, ohne dieses zu Schließen. Diese Vorgehensweise unterscheidet sich insofern vom richtigen Produktionsbetrieb, da die Bauteile normalerweise wiederholgenau und reproduzierbar vom Bauteilfeder ins Werkzeug gelegt werden. Somit ist die Abschätzung der Wiederholgenauigkeit durch manuelles, fehlerbehaftetes Einlegen des Bauteils mit einer Worst-Case Betrachtung gleichzusetzen.

Abbildung 6.6 zeigt die Einzel-Messergebnisse der Sensoren und die daraus berechnete Bauteilverdrehung für zehn Wiederholmessungen. Die kleinste Streuung der Einzelmesswerte tritt an der Position R3 auf, während die Positionen R1 und G2 mit ca. 0,5 mm am stärksten schwanken. Diese Messfehler sind den Ungenauigkeiten beim Einlegen geschuldet. Im Serienbetrieb wird

jedes Bauteil zuerst durch den Niederhalter auf den Aufsatz gedrückt. Anschließend entspannen sie sich, ausgehend von diesem gemeinsamen Referenzzustand. Diese Ausgangsbedingung ist hier nicht gegeben. Aufgrund der Koordinatentransformation ins Bauteilkoordinatensystem ist die Streuung der berechneten Bauteilverdrehung mit ca.  $0,25\text{ mm}$  jedoch vergleichsweise klein. Einlegeungenauigkeiten des Bauteils können dadurch teilweise kompensiert werden.

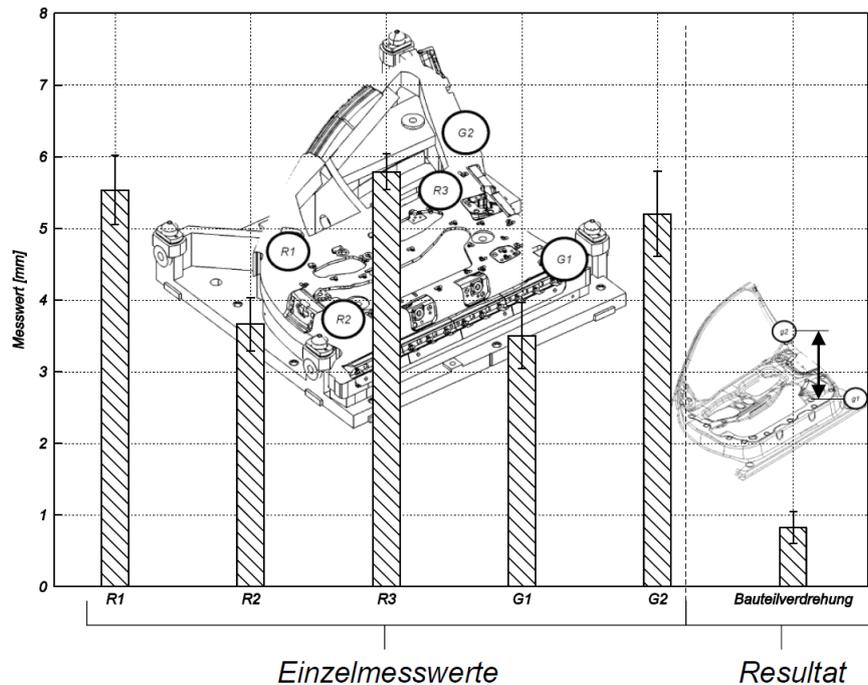


Abbildung 6.6: Wiederholgenauigkeit der Geometriemessung bei zehnmaligen, manuellen Einlegen eines Türinnenbleches

Selbst mit einem mittleren Fehler in der Bauteilverdrehung in dieser Größenordnung, sollten die geometrischen Schwankungen des Bauteils infolge der Rückfederung eindeutig detektierbar sein. Zudem ist im Serienbetrieb, aufgrund der höheren Reproduzierbarkeit des Messvorganges, eine höhere Genauigkeit zu erwarten. Wesentlich für den Erfolg des Messkonzeptes ist dessen Eignung, prozessbedingte Schwankungen der Bauteilgeometrie zu erkennen. Dies wird im nächsten Abschnitt untersucht.

### 6.1.2 Erfassung von Prozessschwankungen

Die Untersuchung der Systemfähigkeit zur Detektion von Prozessschwankungen im Presswerk ist mit verschiedenen Herangehensweisen möglich. Zum einen kann durch die passive, messtechnische Begleitung regulärer Abpressungen ermittelt werden, ob materialbedingte Prozessänderungen erfassbar sind. Zum anderen können durch die Änderung der Maschineneinstellungen, im einfachsten Fall der Blechhalterkraft, geometrische Veränderungen des Bauteils er-

zwungen werden.

### **Erfassbarkeit materialbedingter, unkontrollierter Prozessschwankungen**

Innerhalb eines Kaltbandes verlaufen die Platinen-Eigenschaften kontinuierlich (Neumann, 2013). Werden die Platinen eines solchen Kaltbandes in derselben Reihenfolge an der Presse verarbeitet, wie sie vom Band geschnitten wurden, sollten folglich kontinuierliche Verläufe der Bauteilqualität resultieren. Dies setzt voraus, dass keine Maschineneinstellungen im Laufe der Produktion verändert wurden. Ebenso sollten Sprünge zwischen den Stapeln detektiert werden können, wenn diese von unterschiedlichen Kaltbändern stammen.

Abbildung 6.7 veranschaulicht die fünf gemessenen Abstandssignale für eine herkömmliche, unsortierte Abpressung von 3600 Bauteilen aus verschiedenen Kaltbändern mit konstanter Blechhalterkraft. Die auftretenden Sprünge in der berechneten Bauteilverdrehung können eindeutig, stets nach 290 Platinen, identifiziert werden. Diese Anzahl an Platinen entspricht der Größe eines Platinenstapels. Somit ist die Ursache für diese Geometrieänderungen die unsortierte Verarbeitung der Stapel und deren variierenden Eigenschaften. Die betragsmäßig kleinsten Schwankungen treten im Abstandssignal R3 auf, dessen Werte liegen zwischen 4 und 5 mm. Die größten Änderungen zeigen sich im Abstandswert der Position R2. Dort variiert der Abstand zwischen 4 und 8 mm. Diese Messung legt die Vermutung nahe, dass Änderungen der Bauteilgeometrie sich am deutlichsten an der Position R2, gefolgt von R1, zeigen. Zudem zeigt sich hier der geringe Messbereich der Wirbelstromsensoren als Nachteil. Die hohe Messgenauigkeit der Sensoren wird nur bis zu einem Abstand von 6,6 mm garantiert. Das maximale Abstandssignal von 7,8 mm wird in der gezeigten Abpressung bereits in R2 erreicht. Am Pilotsystem wurde diese funktionale Schwachstelle nicht durch den Einsatz eines anderen Abstands-Sensors verbessert. Bei der Planung solcher Systeme für weitere Türinnenbleche, wie beispielsweise im Kap. 7.3, wird dies berücksichtigt.

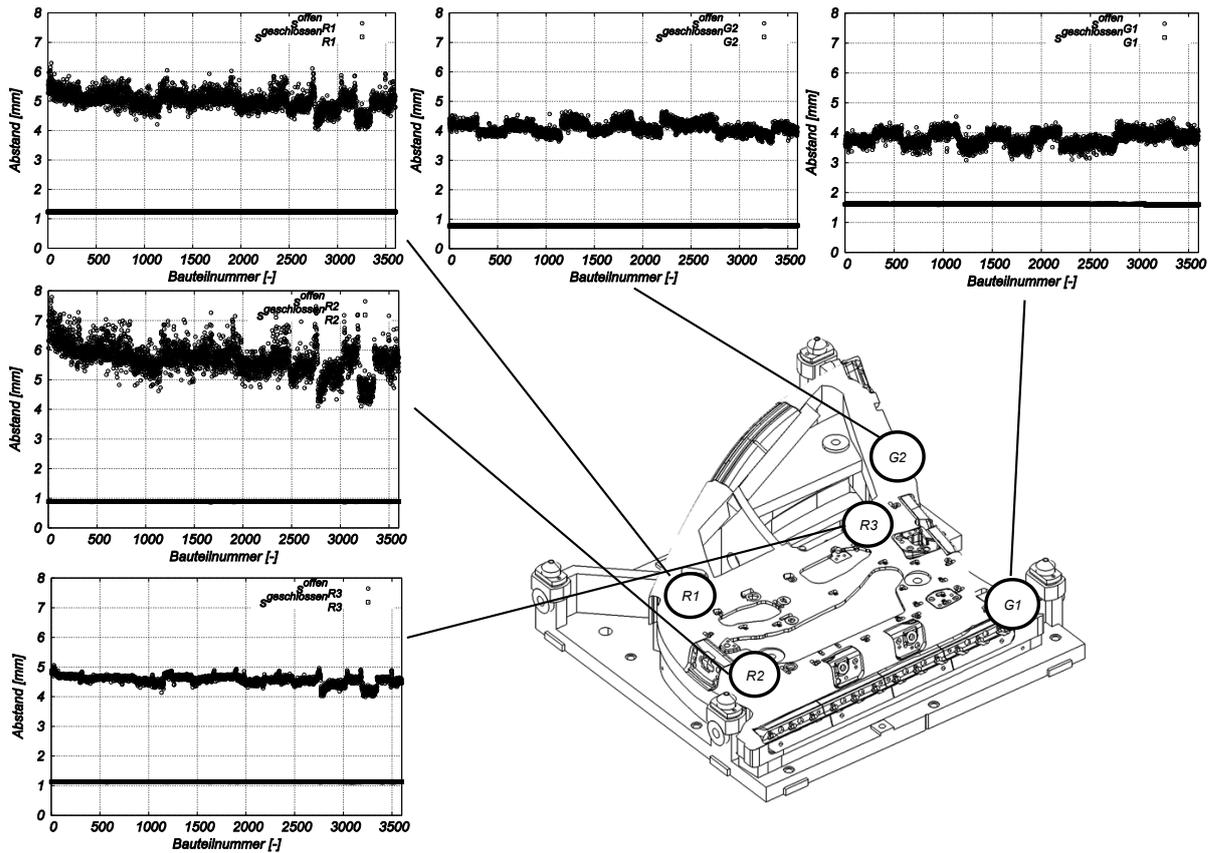


Abbildung 6.7: Darstellung der Einzel-Abstandswerte für eine Abmessung von 3600 Bauteilen

Die Koordinatentransformation auf Basis der Referenzpunkte  $R1$ ,  $R2$  und  $R3$  ins Bauteilkoordinatensystem liefert an diesen Positionen stets die Abweichung von  $0\text{ mm}$ . Innerhalb dieses Systems wird die gesamte maßliche Abweichung an den Geometrie-Masterpunkten  $G1$  und  $G2$  sichtbar. Abbildung 6.8 fasst die transformierten Abweichungen für diese Abmessung, berechnet nach Gl. 5.10, zusammen. Aufgrund der Verschiebung des Masterpunktes  $G2$  zugunsten der Messfläche des Wirbelstromsensors fallen die dort berechneten Maßabweichungen im Vergleich zu  $G2$  deutlich kleiner aus.

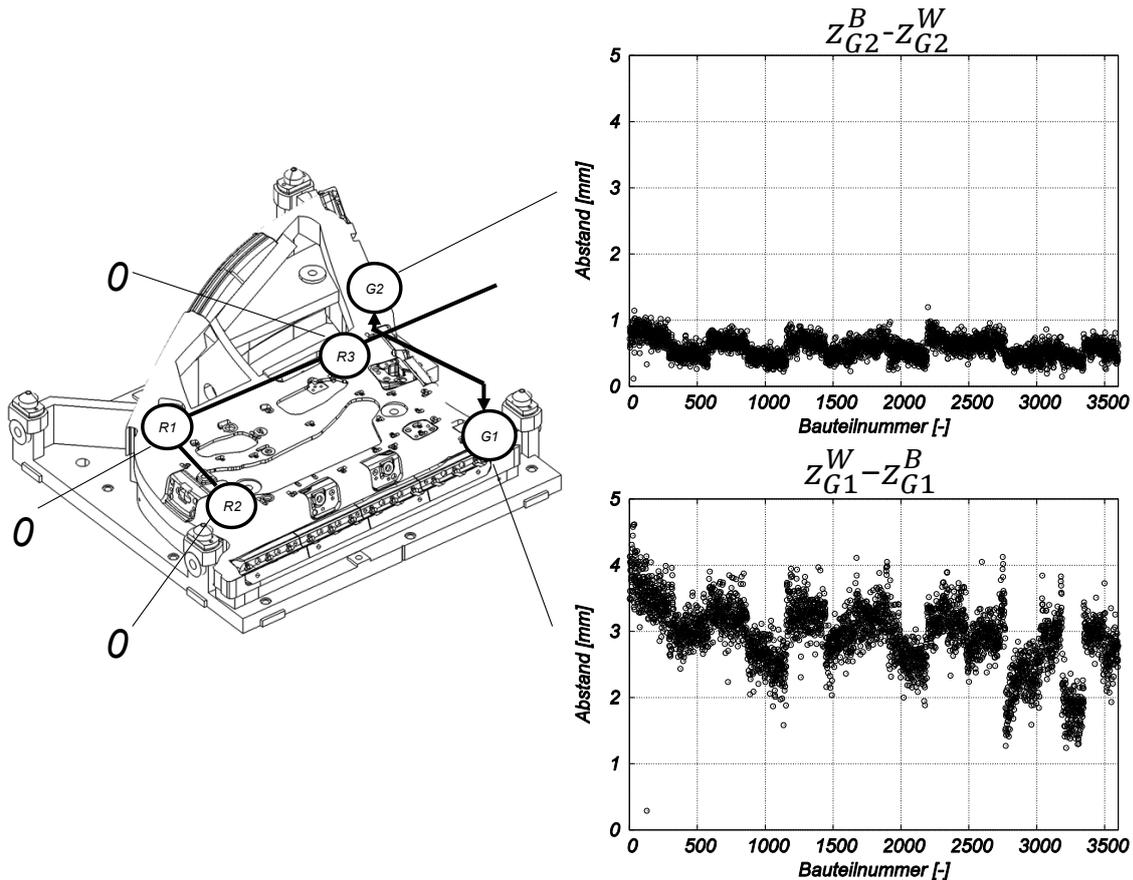


Abbildung 6.8: Berechnete Abweichungen in  $z$  für die Abpressung von 3600 Bauteilen

Die großen Abstandsänderungen in  $R2$  beeinflussen die berechneten Maßabweichungen in  $G1$  und  $G2$ . Die Referenzpunkte  $R1$  und  $R2$  richten das Bauteil im Raum aus. Desto weiter die Geometrie-Masterpunkte vom Mittelpunkt dieser Ausrichtachse entfernt sind, umso stärker wirken sich Änderungen in diesen Referenzpunkten auf die dort berechneten Maßabweichungen aus. So ergibt sich, obwohl die Einzelmessungen an  $G2$  in ähnlicher Größenordnung zu  $G1$  liegen, dass in  $G1$  nach der Transformation viel größere Maßabweichungen errechnet werden. Insofern würden auch höhere Maßabweichungen an einem Geometrie-Masterpunkt resultieren, der am oberen Ende des Fensterrahmens platziert ist.

### Detektierbarkeit kontrollierter, erzwungener Prozessschwankungen

Durch die Änderung der Blechhalterkraft im der AFO15 verändert sich der im Bauteil nach dem Umformen erzielte Spannungs- und Deformationszustand. Über diese Stellgröße können in einfacher Weise Bauteile mit unterschiedlicher Rückfederung hergestellt werden. Folglich lässt sich ein größerer Messbereich des Inlinesystems untersuchen.

Mit drei verschiedenen Einstellungen wurden jeweils fünf Versuchsbauteile produziert. Dabei wird die Kraft pro Zylinder im Sechs-Punkt-Ziehkissen gleichmäßig verstellt. Eine Blechhalter-

kraft von 900 kN pro Bauteil wird beispielsweise, aufgrund der Doppelteilproduktion, durch eine Blechhalterkraft pro Zylinder von 300 kN erzielt. Auf diese Weise wurden Bauteile mit 900, 1200 und 1500 kN vom selben Platinenstapel produziert. Abbildung 6.9 fasst die Ergebnisse dieses Versuchs zusammen. Mit 900 kN, diese Einstellung entspricht der Standardeinstellung im Produktionsbetrieb, werden Bauteilverdrehungen in einer Größe von etwa 5,3 mm berechnet. Jede stufenweise Erhöhung der Blechhalterkraft führt zur Verringerung der Bauteilverdrehung. Bei 1500 kN ergibt sich eine mittlere Bauteilverdrehung der fünf Bauteile von 0,5 mm.

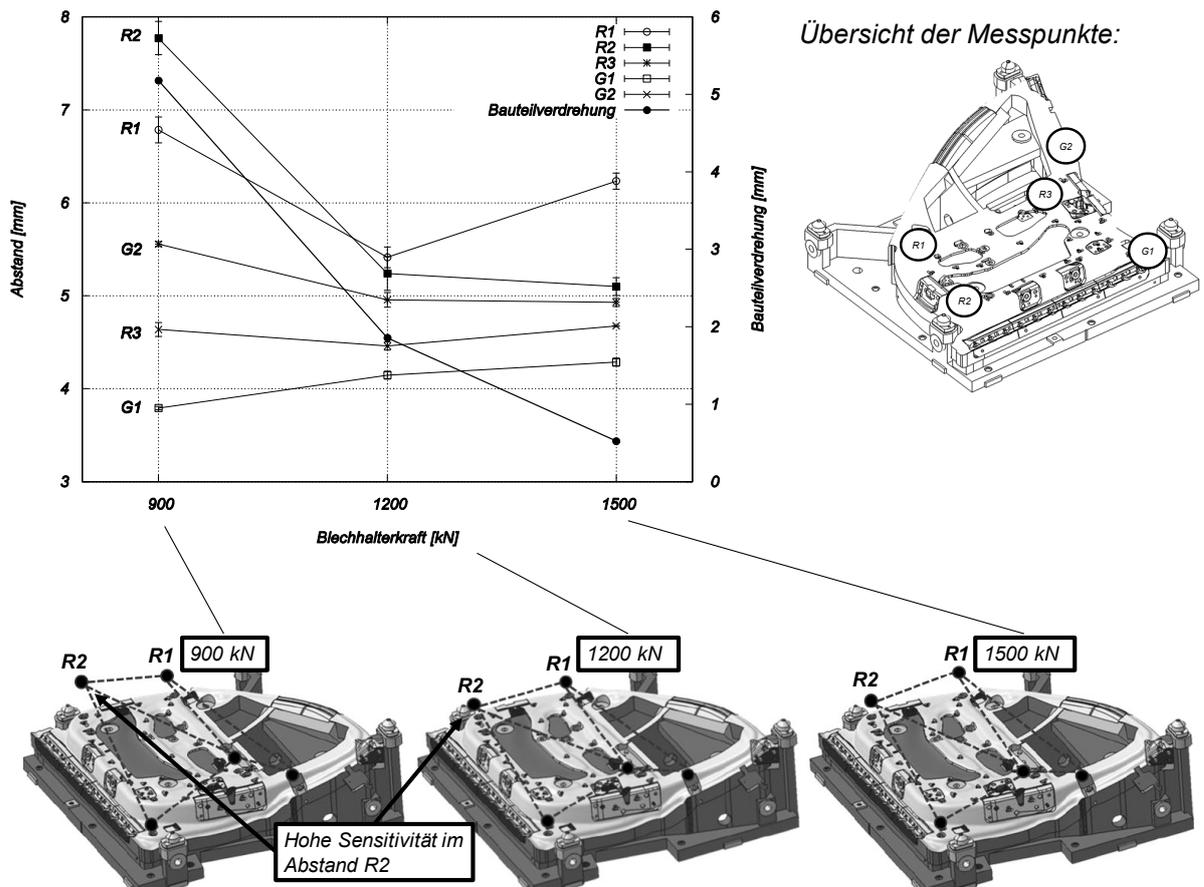


Abbildung 6.9: Zusammenhang zwischen eingestellter Blechhalterkraft und Bauteilverdrehung nach Maier, Liebig et al. (2017)

Dieser Versuch ermöglicht außerdem die Ableitung einer Systematik zwischen den berechneten Bauteilverdrehungen und der gemessenen Einzelabstände. Es bestätigt sich die Vermutung, dass Geometrieänderungen am deutlichsten in den Referenzpunkten R1 und R2 messbar sind. Bei einer Erhöhung von 900 auf 1200 kN verringert sich der Abstand in R2 um 2,5 mm, in dieser Größenordnung ändert sich auch die berechnete Bauteilverdrehung. Die Messpunkte nahe des Schlossbereiches (R3, G1, G2) hingegen zeigen nur kleine Veränderungen von maximal

0,5 mm. Für kleine Bauteilverdrehungen, wenn die Blechhalterkraft auf 1500 kN erhöht wird, gewinnt der Referenzpunkt R1 an Bedeutung. Während R2 nur wenig kleiner wird, vergrößert sich der Abstand zum Bauteil in R1 zunehmend.

Sowohl unkontrollierte, als auch kontrollierte Veränderungen der Bauteilgeometrie können durch das Messkonzept eindeutig detektiert werden. Es gilt nun zu betrachten, in wie weit die aufgenommenen Messwerte auch quantitativ, im Vergleich zu anderen Geometrie-Messsystemen, übereinstimmen. Da die Bewertung der Bauteilgeometrie bislang ausschließlich auf Basis des RPS im Messraum durchgeführt wird, bildet die eingeführte Koordinatentransformation das Bindeglied zwischen Inline- und Offline-Messung. Sie ermöglicht einen direkten Vergleich beider Systeme.

### **6.1.3 Vergleich mit Prüfstand- und Messraumergebnissen**

Die Beurteilung der Bauteilverdrehung erfolgt entsprechend des Prinzips der Drei-Punkt-Auflage mittels Messaufnahmen im Messraum. Für diesen Vergleich wurden aus dem Produktionsprozess gezielt Bauteile ausgeschleust, welche laut Inlinemessung unterschiedliche Bauteilverdrehungen aufweisen. Anschließend konnten diese Bauteile im Messraum taktil vermessen werden. Zu beachten ist die Lage der Messpunkte beim Vergleich der Systeme. Geeigneter als der Geometrie-Masterpunkt *G2* ist es, die Maßabweichung in *G1* und dem Messraum-Messpunkt *R1552* zu vergleichen. Diese beiden Messpunkte sind örtlich nahe beieinander, während im Fensterrahmen zur Integration des Wirbelstromsensors die Position gegenüber *R1553* verändert wurde.

Abbildung 6.10 stellt die für 16 Bauteile ermittelte Maßabweichung in *G1* und *R1552* gegenüber. Qualitativ betrachtet sind beide Verläufe der Maßabweichungen über diese Bauteile ähnlich. Insbesondere die Bauteile Nr. 10 bis 12, mit betragsmäßig kleinen Abweichungen, weisen eine hohe Übereinstimmung auf. Umso größer die Maßabweichung aber wird, desto höher ist auch die Differenz zwischen Inline- und Offlinemessung.

Da das Bauteil im Produktionsprozess in freier, ungespannter und liegender Position im Werkzeug gemessen wird, ergeben sich im Vergleich zur stehenden, gespannten Messraum-Messung signifikante Abweichungen. Zur Untersuchung dieser Differenzen wurde ein Geometrie-Prüfstand nach Abbildung 6.11 entwickelt (vgl. Abbildung A.6). Dieser Prüfstand ermöglicht die Aufnahme und Fixierung des Bauteils entsprechend der Offlinemessung. Über eine schwenkbare Achse kann der gesamte Aufbau von der liegenden in die stehende Ausrichtung des Bauteils versetzt werden. Zwei Laser-Abstandssensoren an den beiden Geometrie-Messpunkten *R1552* und *R1553* ermitteln die Maßabweichung des Bauteils. Dabei messen die Sensoren kontinuier-

lich mit einer Frequenz von  $700\text{ Hz}$  und bilden den Mittelwert aus den Messwerten der letzten  $5\text{ s}$ . Diese Mittelung kompensiert mögliche Bauteilschwingungen und ermöglicht den Einsatz des Prüfstandes in der Produktionsumgebung (vgl. Abbildung A.7).

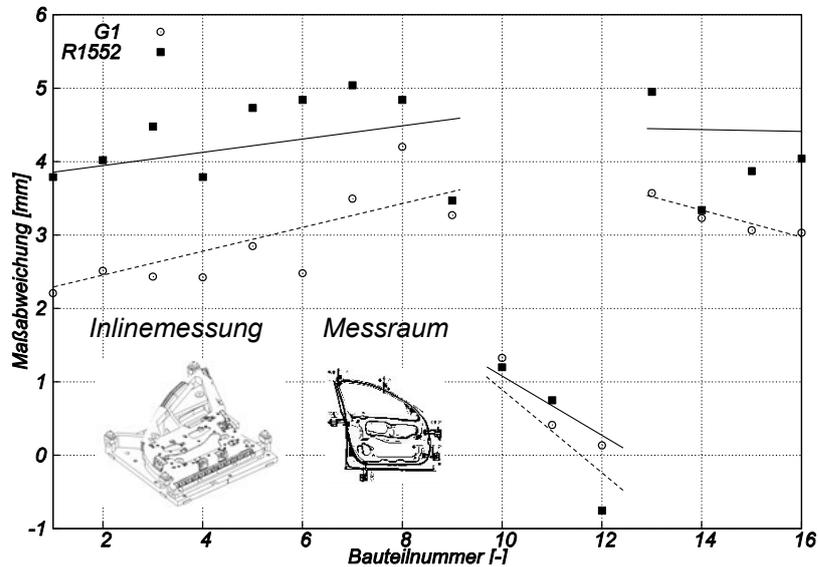


Abbildung 6.10: Vergleich der Maßabweichung von G1 und R1552 für 16 Bauteile

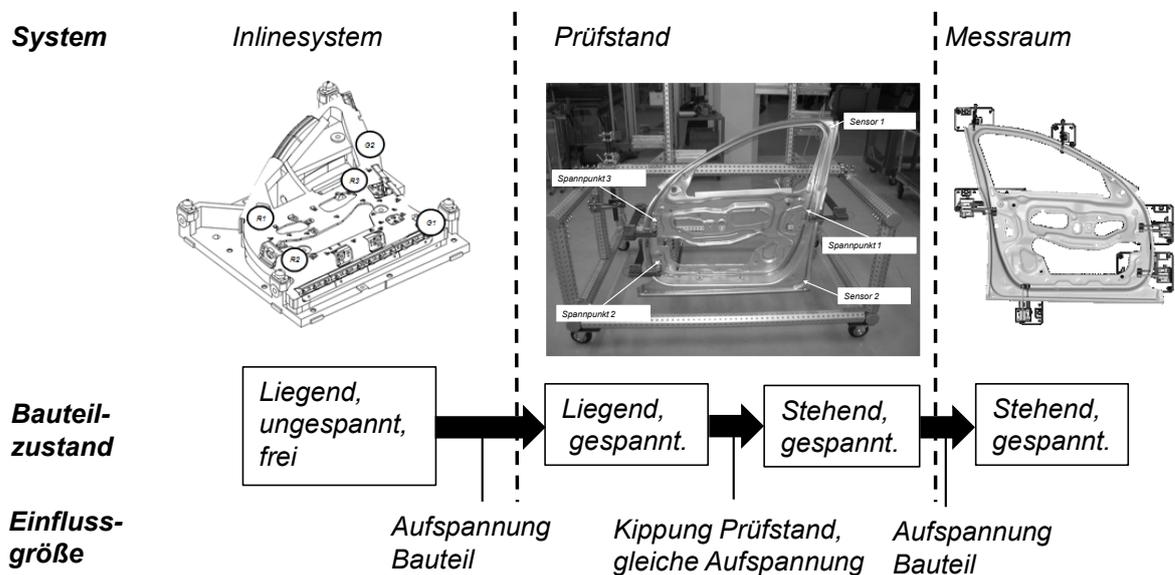


Abbildung 6.11: Geometrie-Prüfstand zur Untersuchung der Einflussgrößen zwischen Inline- und Offlinemessung

Der Einfluss der Bauteilorientierung kann mit dem Prüfstand in der selben Bauteilauflage untersucht werden. Fehler infolge des mehrfachen Spanns werden somit ausgeschlossen. Abbildung 6.12 stellt die experimentellen und theoretischen Ergebnisse zum Einfluss der Bauteil-

lage da. Mit Hilfe des Prüfstandes wurden insgesamt 40 Bauteile von zwei unterschiedlichen Kaltbändern sowohl in liegender als auch stehender Fixierung vermessen. Es zeigt sich, dass dieser Zusammenhang vom Kaltband abhängig ist. Bei Bauteilnummer 16 erfolgt der Kaltbandwechsel und die Differenz der Bauteilverdrehung steigt im Mittel von  $4,5\text{ mm}$  auf  $5,2\text{ mm}$ . Zur Kontrolle wurde eine statische FEM-Berechnung durchgeführt. Das Simulationsbauteil weist eine konstante Blechdicke von  $1,5\text{ mm}$  auf. In Summe ergibt die Simulation ebenfalls einen Einfluss von  $4,5\text{ mm}$ . Je nach der lokalen Abstreckung des Bauteils ändert sich die Bauteilsteifigkeit und damit der Einfluss der Bauteilausrichtung.

### Experiment:

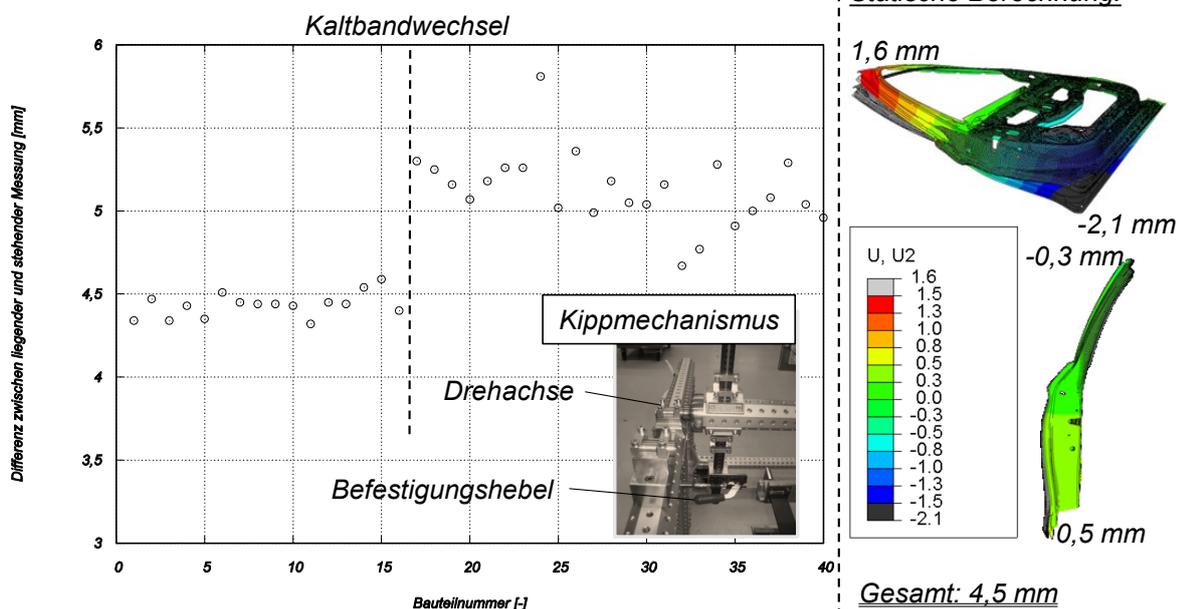


Abbildung 6.12: Untersuchung des Einflusses der Bauteillage auf die Bauteilverdrehung mittels Prüfstand und statischen FEM-Berechnungen

Die FEM-Berechnung verdeutlicht, dass bereits die Ausrichtung des Bauteils und die Wirkung der Schwerkraft Unterschiede in der Größe von mehr als  $2\text{ mm}$  im Messpunkt R1552 verursachen. Da diese Wirkung zudem von der Abstreckung des Bauteils abhängig ist, wird eine direkte Berechnung des Messraum-Messwertes aus der Inlinemessung kompliziert. Neben der Ausrichtung des Bauteils ergeben sich weitere Unterschiede, etwa durch die Spanner und deren komplexe Wirkung auf die Bauteilgeometrie. Ein weitaus pragmatischerer Ansatz als die exakte Berechnung des Messraum-Ergebnisses ist es, jedes System für sich getrennt zu betrachten. Durch die Inlinemessung können Bauteile erkannt werden, welche sich in ihrer Geometrie deutlich von einer vorgegebenen Sollgeometrie unterscheiden. Solange diese Messungen innerhalb eines vorgegebenen Fensters liegen, sind auch in der Messraum-Messung keine größeren Ab-

weichungen zu erwarten.

Zusammenfassend wurde für das Inline-Geometriesystem nachgewiesen, dass trotz der rauen Produktionsumgebung hohe Wiederholgenauigkeiten durch die Verwendung von Wirbelstromsensoren in Nachfolgewerkzeugen erreichbar sind. Sowohl kontrollierte als auch unkontrollierte Prozessschwankungen und deren Wirkung auf die Bauteilgeometrie werden detektiert und sind qualitativ mit den Ergebnissen einer Messraum-Messung vergleichbar. Eine direkte Umrechnung ist dabei, aufgrund zahlreicher, schwer kalkulierbarer Einflussgrößen, komplex. Insgesamt zeigte sich eine hohe Relevanz der Referenzpunkte  $R1$  und  $R2$  im Scharnierbereich für die Erfassung der typischen, durch Rückfederung verursachten Bauteilverdrehung von Türinnenblechen.

## **6.2 Messgenauigkeit der Anhauskantendetektion**

### **6.2.1 Analyse der Wiederholgenauigkeit**

Verschiedene Fehlerquellen beeinflussen das Ergebnis der Bildaufnahme und -auswertung der Sensorkameras im Serienbetrieb. Innerhalb der Presse sind dies die Umgebungseinflüsse, wie Erschütterungen und Vibrationen. Ebenso kann Fremdlicht die Bildaufnahme beeinflussen, beispielsweise tageszeitabhängige Unterschiede des Umgebungslichtes. Im Serienbetrieb bestimmen diese Umgebungseinflüsse die maximal erreichbare Messgenauigkeit. Es wird eine Auswertung starrer Referenzelemente, in diesem Fall einer sichtbaren Werkzeugkante im Scharnierbereich, durchgeführt. Diese Werkzeugkante verändert sich während der Produktion nicht. Im Idealfall ergibt die Kantendetektion für jeden Pressenhub den selben, konstanten Wert. Sämtliche Abweichungen vom konstanten Referenzwert bilden ein gesamthaftes Maß zur Abschätzung der Fehlereinflüsse im Serienbetrieb.

Die im Scharnierbereich aufgenommenen Bilder enthalten eine starre Werkzeugkante des Bauteilaufsatzes. Abbildung 6.13 stellt den Verlauf der vertikalen Position  $Y$  dieser Kante für 2000 Bauteile während einer Serienabpressung dar. Die Position  $Y$  schwankt zwischen 84,9 und 85 mm mit einer Standardabweichung von 0,008 mm. Im Laufe der Abpressung wird kein abdriften des Mittelwertes beobachtet.

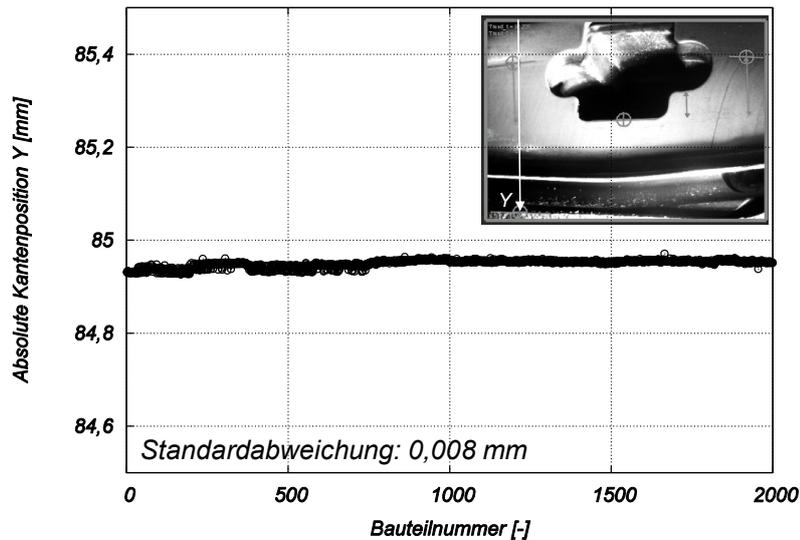


Abbildung 6.13: Absolute Position Y der starren Werkzeugkante im Scharnierbereich nach Maier, Wierer et al. (2016)

Verglichen mit den zu erwartenden Veränderungen am Bauteil über mehrere Millimeter, ist der Fehlereinfluss durch Vibrationen und Belichtungsveränderungen vernachlässigbar klein. Es konnte somit nachgewiesen werden, dass die selbe Kante innerhalb der Produktionsumgebung mit hoher Wiederholgenauigkeit erfassbar ist.

### 6.2.2 Reaktion auf Prozessschwankungen

Nachfolgend wird eine Abpressung von 3600 Bauteilen mit konstanten Maschineneinstellungen betrachtet. Aufgezeichnete Prozessschwankungen sind somit auf die Eingangsgrößen der Platinen zurückzuführen. Nach jedem Platinenstapel, also nach ca. 290 Platinen, kann entsprechend Abbildung 6.14 ein Sprung im Verlauf der Anhaulante, sowohl im Scharnier- als auch im Schlossbereich, identifiziert werden. Während die Abstandswerte im Scharnierbereich in einer Größenordnung von 3 mm variieren, können im Schlossbereich Abstände von 8 bis 18 mm gemessen werden. Materialbedingte Schwankungen wirken sich somit deutlich stärker auf den Schlossbereich aus. Diese Beobachtung konnte bereits im Rahmen der Simulationsanalysen gemacht werden. Dort zeigten Änderungen der Reibzahl oder der Fließkurve eine größere Wirkung auf diesen Bereich.

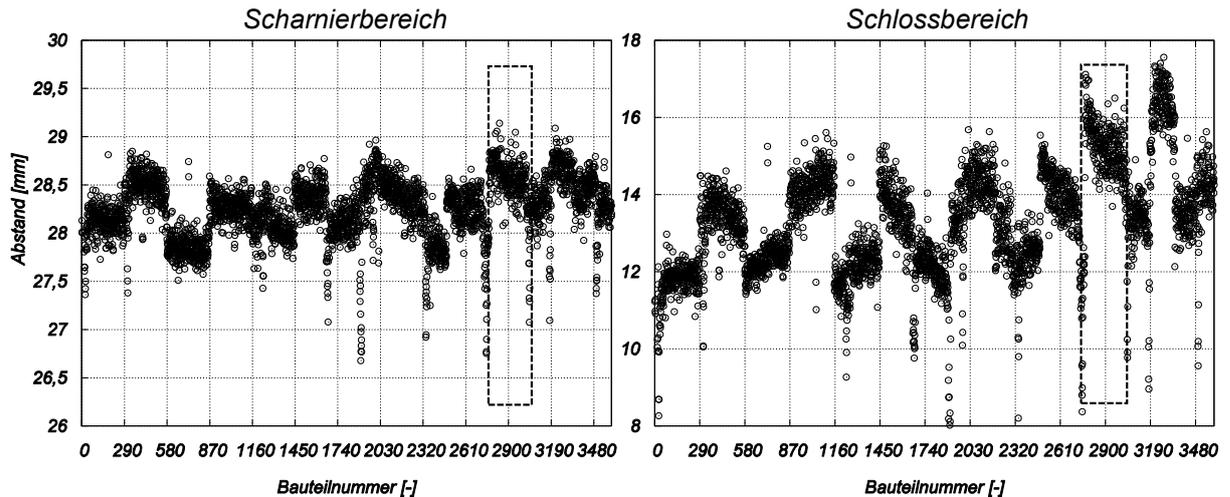


Abbildung 6.14: Aufgezeichnete Prozessschwankungen der Anhaulante mit konstanter Blechhalterkraft für 3600 Bauteile

Beispielhaft dargestellt sind in Abbildung 6.15 die Ergebnisse der Bildverarbeitung für zwei Bauteile. Die Auswertung ergab Anhaulantenabstände im Schlossbereich von 8 und 15 mm. In Relation zum Referenzloch mit einem Radius von 10 mm können diese Auswertungsergebnisse qualitativ nachvollzogen werden.

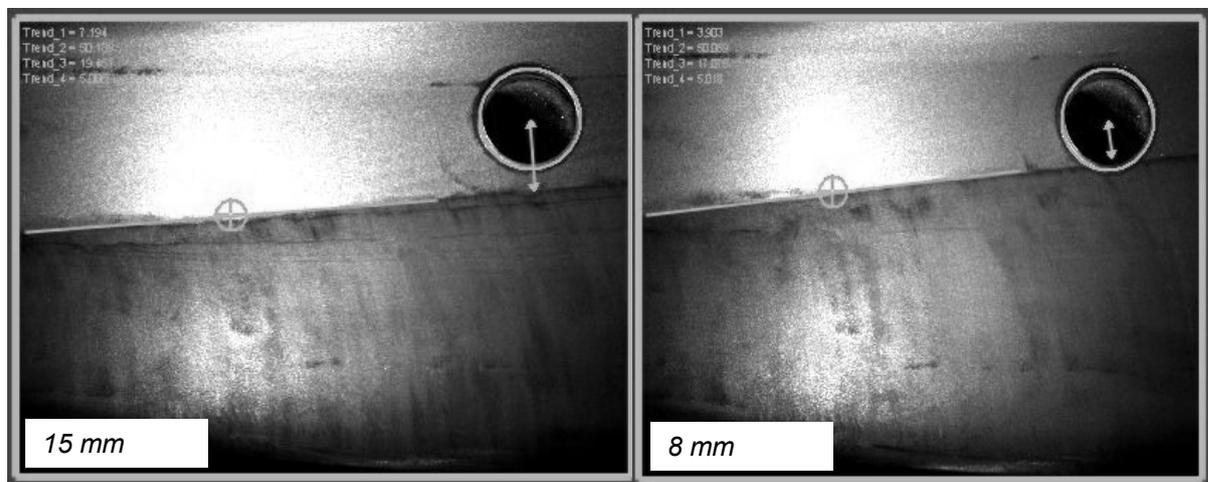


Abbildung 6.15: Beispielhafte Auswertung zweier Schloss-Bilder mit Anhaulantenabständen von 8 und 15 mm

Die auftretenden Prozesssprünge erfolgen für beide untersuchten Bereiche stets zum gleichen Zeitpunkt und mit gleichem Vorzeichen. Dabei muss die Definition des Anhaulanten-Abstandes aus der Bildverarbeitung berücksichtigt werden. Während ein steigender Abstand im Schlossbereich eine höhere Abstreckung zur Folge hat, verringert sich die Abstreckung im Scharnierbereich dadurch. Es ist daher von einer Wechselwirkung zwischen den Bereichen auszugehen.

Wird der Materialeinlauf im Schlossbereich, beispielsweise infolge verminderter Reibung, verkleinert, so muss mehr Material aus dem Scharnierbereich fließen und umgekehrt. Auffällig sind in diesem Zusammenhang die regelmäßig auftretenden Ausreißer in Richtung geringer Abstände, welche für beide Analysebereiche an denselben Bauteilen auftreten. Dies bestärkt die Richtigkeit der Messung. Diese Bauteile sind vergleichsweise stark im Scharnierbereich abgestreckt und laufen im Schlossbereich weit ein.

### **6.2.3 Vergleich mit manuellen Messungen**

Eine manuelle, direkte Messung der Anhaulante ist durch die Verwendung eines Messschiebers am Fertigteil möglich. Beispielsweise wird, ausgehend von der Kante des Referenzloches im Schlossbereich, der Abstand zur Anhaulante gemessen und der Lochradius addiert. Durch die Messung der Blechdicke nahe der Auswertebereiche besteht zudem die Möglichkeit eines indirekten Vergleiches.

#### **Direkte Messung der Anhaulante**

Der über die interne Bildverarbeitung der Kamera ausgegebene Abstandswert für die Anhaulante aus den beiden Bauteilbereichen kann vergleichsweise einfach überprüft werden. Mittels eines digitalen Messschiebers können, ausgehend von den Referenzausschnitten am Bauteil, diese Abstände nachgemessen und dokumentiert werden. Für einen Vergleich der manuellen Messung mit der Inlinemessung wurden insgesamt 16 Bauteile mit unterschiedlichen Prozesseinstellungen gefertigt. So konnten neben der Standardeinstellung Bauteile mit Zusatzbeölung, variierenden Blechhalterkräften und Einlegepositionen gefertigt werden. In Abbildung 6.16 sind diese Bauteile gekennzeichnet. Während die Bildverarbeitung eine gemittelte Gerade, basierend auf den gesamten Auswertebereich, detektiert, kann mit dem Messschieber nur ein Punkt der Anhaulante zur Messung herangezogen werden. Ist der Kantenübergang in diesem Messpunkt unscharf, wird eine genaue manuelle Messung erschwert.

Im Schlossbereich treten Reißen am Bauteil erst ab einem Abstand von 19 mm auf, Falten der 1. Art hingegen zeigen sich unterhalb von 6 mm. Diese Grenzen spannen ein Prozessfenster mit einer Größe von mehr als 10 mm für dieses Türinnenblech auf. Die ersten sechs Bauteile sind mittels Standardeinstellungen gefertigt, diese weisen Abstandswerte im Schlossbereich zwischen 12 und 14 mm auf. Die Bauteile 7 bis 9 weisen eine flächige Zusatzbeölung von  $0,5 \frac{g}{m^2}$  auf. Diese führt zu einem größeren Materialeinlauf im Schlossbereich bis knapp zur Falten- grenze. Bei den Bauteilen 10 bis 12 wurde die Blechhalterkraft gleichmäßig in allen Zylindern erhöht. Anschließend wurde sie für die Bauteile 13 und 14 reduziert. Für die Bauteile 15 und 16 wurde die Position der Platine und der Grobeinweiser größtmöglich (mehrere Millimeter)

verändert. Die Platinenlage zeigte im Rahmen dieses geringen Messumfanges keinen Einfluss.

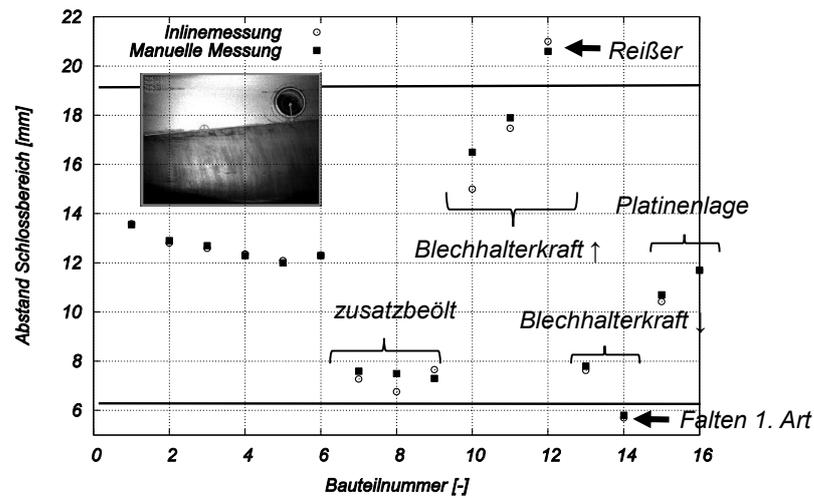


Abbildung 6.16: Vergleich mit manuellen Messungen der Schloss-Anhaukante

Die Messergebnisse für diese 16 Bauteile sind analog dazu für den Scharnierbereich in Abbildung 6.17 veranschaulicht. Die Zusatzbeölung an den Bauteilen 7 bis 9 führt dort zu keiner deutlichen Veränderung gegenüber den Standardbauteilen 1 bis 6. Jedoch hat die Blechhalterkraft, welche für die Bauteile 10 bis 14 variiert wurde, großen Einfluss auf die dortige Anhaukante. Bei der vorangegangenen Betrachtung materialbedingter Prozessänderungen konnte beobachtet werden, dass die beiden Analysebereiche sich untereinander beeinflussen. Wird die Blechhalterkraft an allen Zylindern gleichermaßen verändert, so führt dies zu einer höheren Abstreckung in beiden Bauteilbereichen. Zwischen 19 und 29 mm traten keine Reißen oder Falten auf. Ebenfalls zeigte die Platinenposition keine messbare Auswirkung.

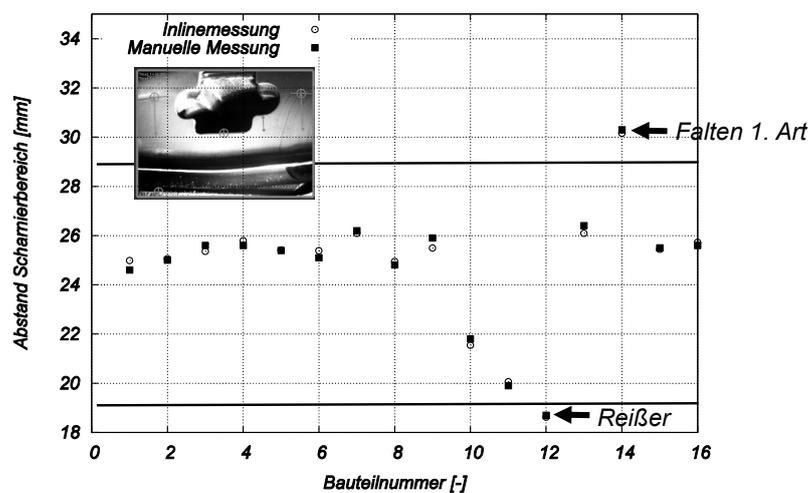


Abbildung 6.17: Vergleich mit manuellen Messungen der Scharnier-Anhaukante

Die im Vorfeld durchgeführten simulationsgestützten Sensitivitätsanalysen lieferten tendenziell ähnliche Erkenntnisse. So hat die Zusatzbeölung mehr Einfluss auf den Schlossbereich, während die Blechhalterkraft insbesondere den Scharnierbereich beeinflusst. Wie auch in der Simulation, wurde die Blechhalterkraft jedoch nur flächig, nicht aber lokal, verändert. Trotz diverser Ungenauigkeiten bei der manuellen Messung der Anhaulanten mit dem Messschieber ergibt der Vergleich in beiden Bereichen eine gute Übereinstimmung. Folglich ermöglicht dieses Hilfsmittel eine schnelle Kontrolle der durch die Inlinemessung generierten Bauteilinformationen.

### Indirekter Vergleich mit der lokalen Blechdicke

Neben der direkten Messung der Position der Anhaulante kann außerdem die lokale Blechdicke mit Hilfe einer Mikrometerschraube gemessen werden. Da die Position der Anhaulante einen Rückschluss auf den Umformprozess und den lokalen Spannungszustand des Bauteils liefert, existiert ein Zusammenhang mit der lokalen Ausdünnung des Materials. Die ausgewählten Messpunkte für die lokale Blechdicke sind in Abbildung 6.18 gekennzeichnet. Es zeigt sich für beide Bereiche ein linearer Zusammenhang zwischen lokaler Blechdicke und Anhaulantenposition. Aufgrund der Definition des gemessenen Abstandes verlaufen die beiden Diagramme gegenläufig, da ein höherer Abstand im Schlossbereich mit einer höheren Abstreckung einhergeht. Im Scharnierbereich hingegen bedeutet ein größerer Abstand mehr Materialeinzug, wodurch weniger Umformung aus der Materialdehnung und Ausdünnung kommt.

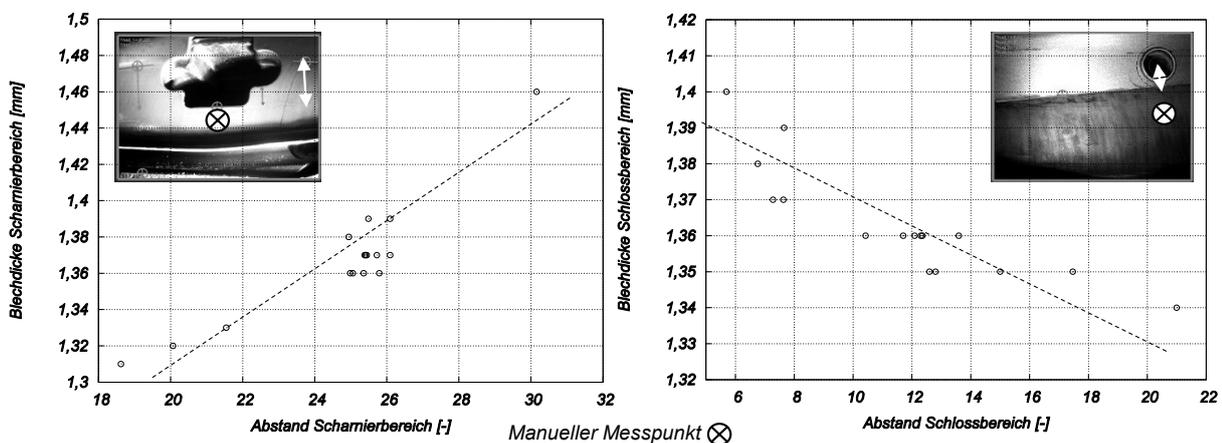


Abbildung 6.18: Vergleich der mittels Mikrometerschraube gemessenen Blechdicken mit den Positionen der Anhaulante für 16 Bauteile

Zusammenfassend konnte für die Anhaulantendetektion nachgewiesen werden, dass sie in der Serienproduktion eine ausreichende Messgenauigkeit erzielt. Sowohl die wiederholte Messung einer starren Referenzkante, als auch die Vergleichsmessungen mit alternativen Messmitteln bestätigten dies. Darüber hinaus konnte die Anhaulante aller gemessenen Bauteile mit derselben

Einstellung fehlerfrei ausgewertet werden. Dies ist ein wichtiger Aspekt für die Serientauglichkeit. Am Beispiel des betrachteten Pilotsystems wurden so mehr als 350000 erfolgreiche Auswertungen im Untersuchungszeitraum durchgeführt. Im Idealfall dienen die aufgenommenen Bilder einer Abpressung als Datenbasis zur Festlegung der Einstellungen. Mit den so definierten Parametern wird in der darauffolgenden Abpressung überprüft, ob alle Bauteile erfasst werden konnten. Zur Reduzierung der Datenmengen sollten außerdem Bedingungen zur Bildspeicherung festgelegt werden. Beispielsweise kann dies die Überschreitung eines Grenzwertes sein. Die Bilder dienen dann zum Nachweis der Richtigkeit der Bildverarbeitung und ermöglichen die Anpassung der Auswertung, beispielsweise der Suchfenster und ihrer Größe.

### **6.3 Vergleich der entwickelten Messkonzepte**

Die entwickelten Inline-Messkonzepte für Geometrie und Einlaufweg wurden bislang stichprobenartig, anhand von ausgewählten Bauteilen, mit bestehenden Messmitteln verglichen. Um die Plausibilität der von den Systemen generierten Messdaten umfangreicher zu analysieren, können diese auch untereinander für eine große Anzahl von Bauteilen verglichen werden. Wichtig für eine solche Untersuchung ist, dass keine Maschineneinstellungen geändert werden. Beispielsweise könnte die Erhöhung der Materialrückhaltung in einem Bereich, dessen Anhauskante nicht detektiert wird, zur Veränderung der Bauteilgeometrie führen, ohne eine Änderung der Anhauskante in Schloss- oder Scharnierbereich feststellen zu können. Deshalb werden für diesen Versuch keine lokalen Blechhalterkräfte verändert. Jegliche aufgenommenen Prozessänderungen resultieren also aus den Eingangsgrößen der Platinen, nicht aber durch die Änderung von Maschineneinstellungen. Abbildung 6.19 stellt die Messwerte aus Anhauskantendetektion im Schlossbereich und Bauteilgeometrie für eine Abpressung von 3600 Bauteilen mit konstanter Blechhalterkraft dar. Dabei werden jeweils die gleitenden Durchschnitte aus den letzten 5 Messwerten dargestellt, um die Grafik übersichtlicher zu gestalten.

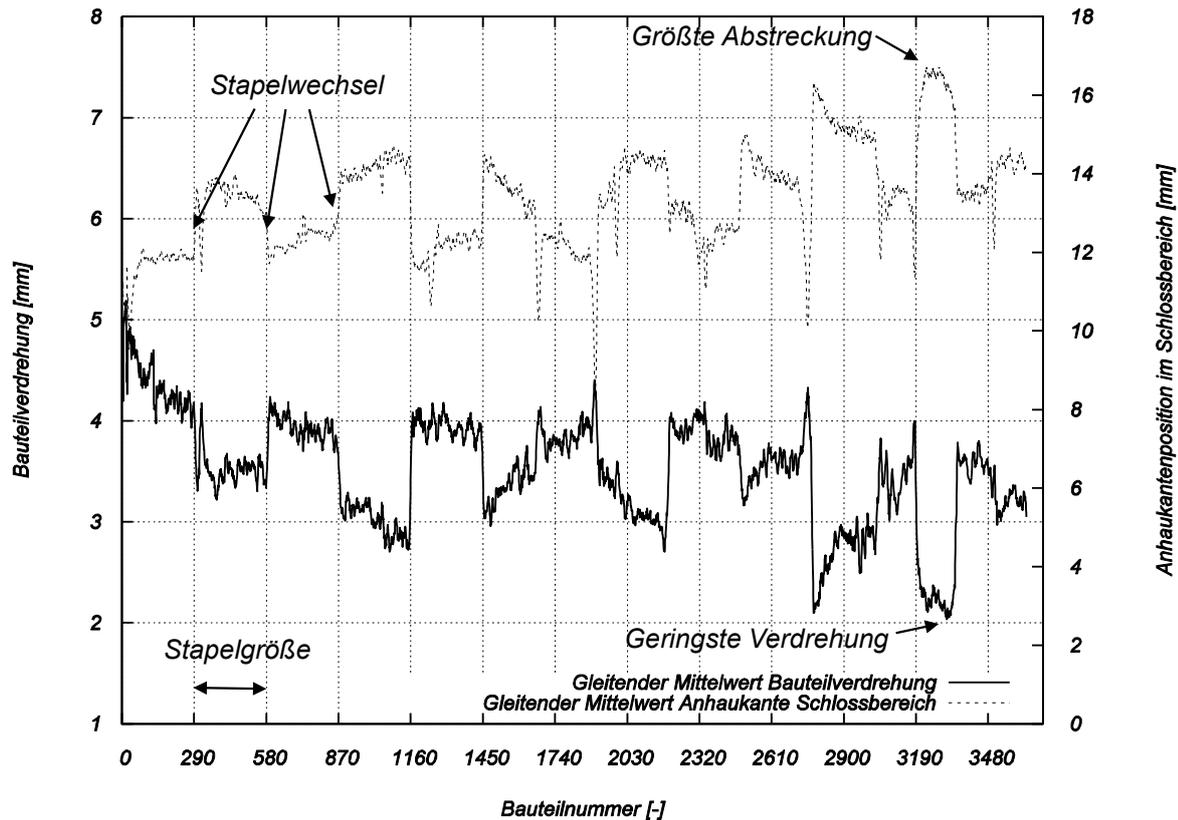


Abbildung 6.19: Vergleich der gleitenden Mittelwerte der Anhaukantenposition im Schlossbereich und Bauteilverdrehung von 3600 produzierten Bauteilen

Jede Änderung der Position der Anhaukante im Schlossbereich führt gleichermaßen zu einer Änderung der gemessenen Bauteilverdrehung. So treten nach jedem Platinenstapel, deren Größe jeweils 290 Platinen umfasst, Sprünge in den gemessenen Verläufen auf. Aufgrund der Definition der Anhaukantenposition im Schlossbereich, dessen Bezug der Lochmittelpunkt ist, ist ein gegenläufiges Verhalten beobachtbar. Größere Abstände in diesem Bereich bedeuten eine höhere Abstreckung und führen zu einer geringeren Rückfederung bzw. Bauteilverdrehung. Das Platinenpaket nach Nummer 3190 führt zu Bauteilen mit dem höchsten Abstand, somit der höchsten Abstreckung und geringsten Bauteilverdrehung für diese Abpressung.

Insgesamt zeigt dieser Versuch, dass ein konkreter Zusammenhang zwischen dem Materialeinlauf im Schlossbereich und der resultierenden Bauteilgeometrie besteht, solange an der lokalen Rückhaltung im Umformprozess nichts verändert wird. Über die vergleichsweise einfach erkennbare Position der Anhaukante kann also auch ohne Inline-Geometriemessung die Rückfederung des Türinnenbleches abgeschätzt werden. Gleichzeitig verdeutlicht dieser Versuch auch die Notwendigkeit einer sortenreinen Verarbeitung der Platinen in der Reihenfolge des Platinenschnittes. Dadurch wird eine effiziente Steuerung des Prozesses durch den Maschineneinsteller ermöglicht.

Mithilfe eines Falschfarben-Diagramms wird in Abbildung 6.20 außerdem die Position der Anhaulante im Scharnierbereich ergänzt. Die Abhängigkeit zwischen den Anhaulanten im Schloss- und Scharnierbereich wird dadurch sichtbar. Umso mehr Material über den Schlossbereich einläuft, desto weniger kann über den anderen Bereich nachfließen. Über die farbliche Markierung der Punkte ist die Größe der Bauteilverdrehung eines jeden Punktes gegeben. Im rechten, oberen Bereich des Diagrammes befinden sich die Bauteile mit der geringsten Verdrehung von etwa  $1,5 \text{ mm}$ , der höchsten Abstreckung im Schlossbereich aber der geringsten Abstreckung im Scharnierbereich. Umgekehrt dazu verhält es sich mit den Punkten im linken, unteren Bereich des Diagrammes.

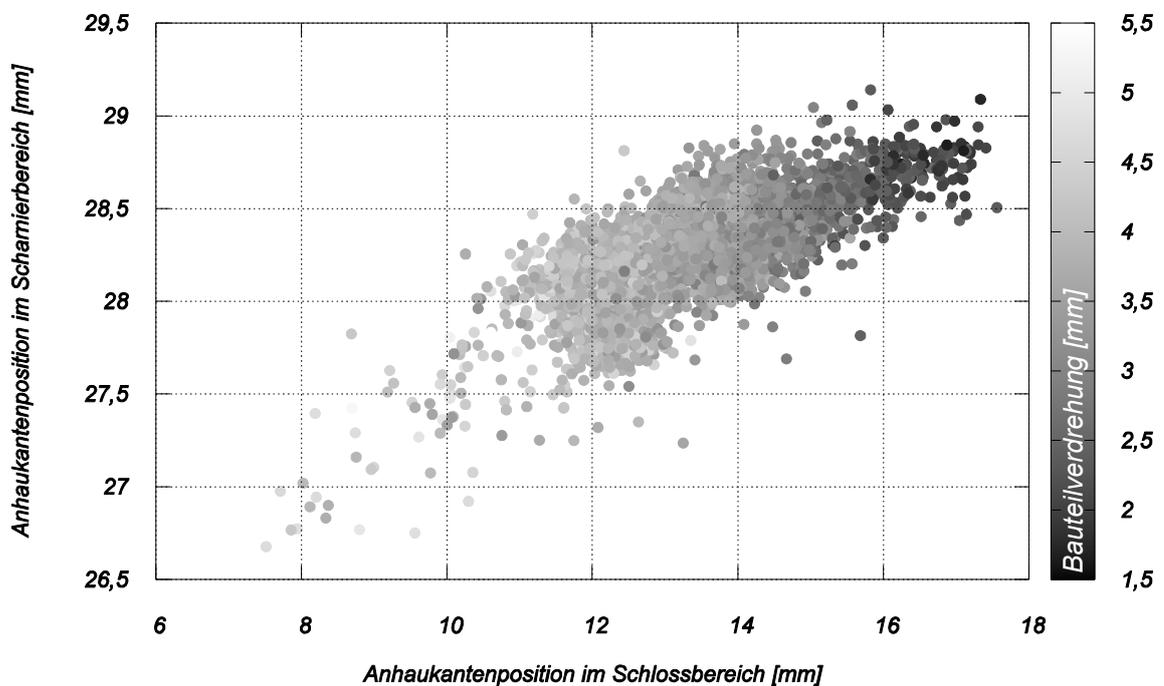


Abbildung 6.20: Falschfarben-Diagramm der Bauteilverdrehung

Zwar zeigt sich eine Abhängigkeit zwischen diesen drei Messinformationen. Das Diagramm bildet jedoch nur einen Zustand für die im Versuch gewählten Maschineneinstellungen ab. Werden die einzelnen Blechhalterkräfte zusätzlich variiert, steigt die Komplexität dieses Systems beträchtlich. Um mit diesen Messsystemen eine Wirkung im Presswerk zu erzielen, bedarf es jedoch möglichst einfacher, praxistauglicher Ansätze für die Nutzung dieser Messinformationen. Im nächsten Kapitel werden solche Ansätze vorgestellt.



## 7 Potentiale der entwickelten Systeme für den Produktionseinsatz

Die Validierung der Inline-Messsysteme ergab, dass beide Messsysteme relevante Informationen über die produzierten Bauteile erzeugen. Sie können nun zur Unterstützung des Produktionsprozesses eingesetzt werden und eine positive Wirkung für das Presswerk erzielen. Je nach dem Einbettungsgrad der Inline-Messtechnik im Produktionsbetrieb existieren dabei verschiedene Wirkungspotentiale, welche in Tabelle 7.1 zusammengefasst sind. Im einfachsten Fall werden die generierten Informationen nur zur Fehleranalyse eingesetzt. Wirkungsvoller ist aber die präventive Prozesskorrektur während der Produktion. Als höchste Integrationsstufe gilt der bereichsübergreifende Einsatz der Systeme und ihrer Informationen.

*Tabelle 7.1: Wirkung der Inline-Messtechnik in Abhängigkeit ihres Einbettungsgrades in der Produktion*

| <b>Einbettungsgrad</b>                      | <b>Beschreibung</b>  | <b>Wirkung</b>  |
|---|--|---|
| Passive Prozessüberwachung                  | Prozessvisualisierung ohne Eingriff                              | Rückwirkende Fehleranalyse, Identifizierung von fehlerhaften Bauteilen, Objektives Monitoring   |
| Aktive Prozesskorrektur                     | Korrekturen durch Fachkräfte zur Einhaltung von Toleranzgrenzen. | Präventive Prozesskorrektur bevor Fehler auftreten, Ableitung fundierter Handlungsempfehlungen. |
| Automatische Prozessregelung                | Vernetzung von Inlinesystemen, Werkzeug und Maschine             | Engere Prozessfenster beherrschbar, Prozesskorrektur im laufenden Betrieb.                      |
| Durchgängige, bereichsübergreifende Nutzung | Aufbau einer Datenbasis aus den Werkzeugeinarbeiten              | Abgleich von Simulation und Realität, Vergleiche zwischen Einarbeits- und Produktionspressen.   |

Diese Potentiale werden nachfolgend, anhand ausgewählter Beispiele, für die entwickelten Systeme nachgewiesen. Anhand des Pilotsystems wird das Vorgehen zur präventiven Prozesskorrektur beschrieben. Komplexe Fehlerbilder werden durch den Einsatz von Inline-Messtechnik an einem Seitenrahmen analysiert. Zudem wird dadurch die Übertragbarkeit der Konzepte auf andere Bauteiltypen nachgewiesen. Abschließend wird anhand eines Türinnenbleches die Nutzbarkeit von Inline-Messtechnik in der Werkzeugeinarbeit untersucht.

## 7.1 Präventive Korrektur des Produktionsprozesses

Der Vergleich der beiden Inlinesysteme verdeutlichte die Notwendigkeit einer sortierten Verarbeitungsstrategie, um eine präventive Prozesslenkung zu ermöglichen. Daher wird für diesen Versuch die Verarbeitungsreihenfolge der Platinen mit ihrer Position am Coil abgestimmt. Begonnen wird mit dem letzten Stapel. Dessen erste Platine ist zugleich die letzte, vom Coil geschnittene, Platine. Somit wird das untersuchte Kaltband entgegen dessen Schnittrichtung an der Presse verarbeitet. Eine gleichgerichtete Verarbeitung ist nur möglich, wenn die Platinenpakete nach dem Schnitt gewendet wurden. Dies war bei den betrachteten Paketen nicht der Fall.

Neben der experimentell ermittelten Reißergrenze wird in Abbildung 7.1 eine Eingriffsgrenze definiert, nach deren Überschreiten ein Prozesseingriff erfolgen soll. Solche Prozesseingriffe sind beispielsweise die Veränderung der Blechhalterkraft oder die Variation der Distanzhöhen. Da die Blechhalterkraft über die Maschinensteuerung schnell und unkompliziert verändert werden kann, ist diese Art des Prozesseingriffes für den Serienbetrieb geeigneter, sofern keine aktiven Distanzen verwendet werden.

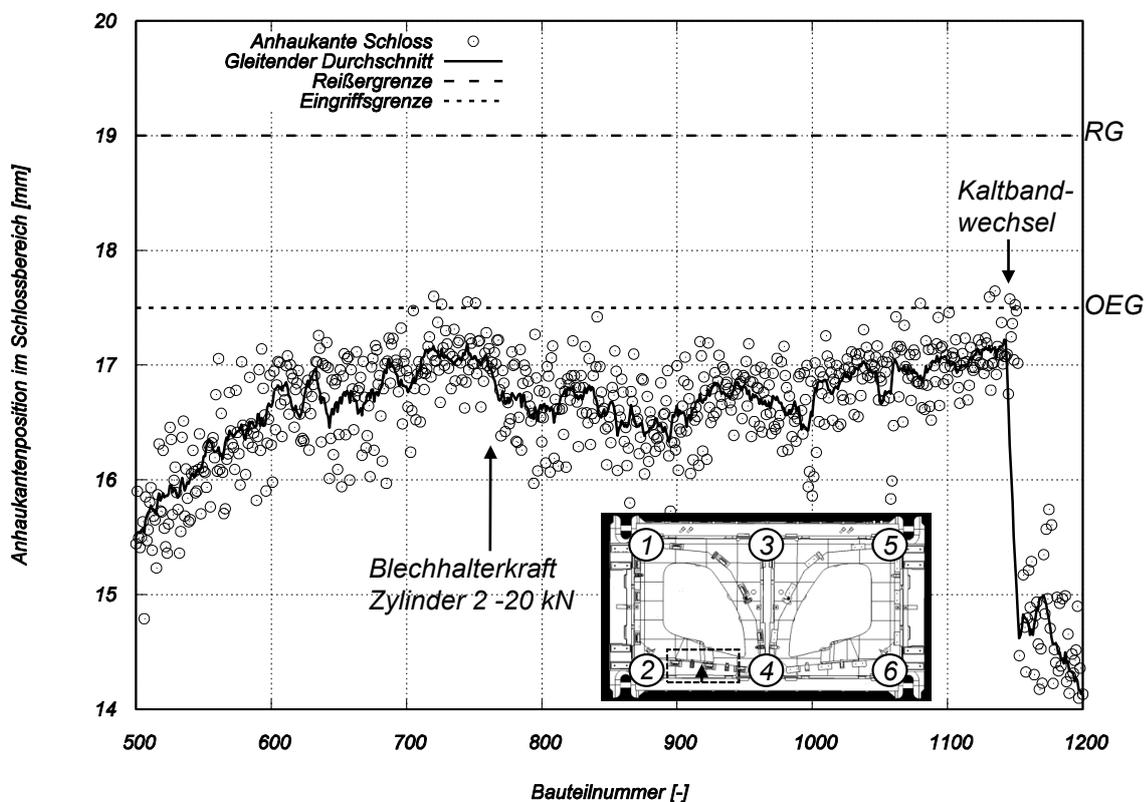


Abbildung 7.1: Exemplarische Prozesskorrektur nach Überschreiten der Eingriffsgrenze der Anhaukante im Schlossbereich während einer Serienabpressung

Insgesamt stellt sich über das Kaltband ein kontinuierlicher Verlauf der gemessenen Anhaulantenposition im Schlossbereich ein. Sprünge zwischen den Stapeln können nicht identifiziert werden. Über das gesamte Kaltband hinweg steigt der Abstand an, die lokale Abstreckung des Materials nimmt also zu. Zwischen Bauteilnummer 700 und 800 überschreiten einige Bauteile die festgelegte Eingriffsgrenze. Als Reaktion auf diese Grenzwertüberschreitung wird die Blechhalterkraft an Zylinder 2, der sich nahe am untersuchten Schlossbereich befindet, um  $20\text{ kN}$  reduziert. Dabei wurde im Vorfeld das Tragbild der Distanzen überprüft, wobei dort keine tragende Distanz identifiziert werden konnte. Selbst eine geringe Änderung kann über die Anhaulantenposition erkannt werden. Die Reduzierung der Blechhalterkraft um  $20\text{ kN}$  verringert den Anhaulanten-Abstand im Mittel um  $0,5\text{ mm}$ . Somit konnte der lokale Materialeinlauf korrigiert werden. Bis zum Ende des Kaltbandes bei Bauteilnummer 1150 steigt die Abstreckung des Bauteils weiter an. Am Kaltbandende überschreiten weitere Bauteile die Eingriffsgrenze, jedoch ist hier eine Prozesskorrektur nicht mehr zielführend aufgrund des anstehenden Kaltbandwechsels. Dieser führt zu einem großen Sprung in der lokalen Abstreckung des Schlossbereiches weg von der Reißergrenze.

Ergänzend dazu sind die Verläufe für Scharnier-Anhaulante und Bauteilverdrehung in der Abbildung 7.2 aufgezeichnet. Diese unterliegen vergleichsweise geringen Änderungen und werden durch die Verstellung der Blechhalterkraft im Zylinder 2 nicht merkbar beeinflusst. Aufgrund der hohen Abstreckung im Schlossbereich nahe der Reißergrenze resultieren geringe Bauteilverdrehungen in der Größenordnung von ein bis zwei Millimetern.

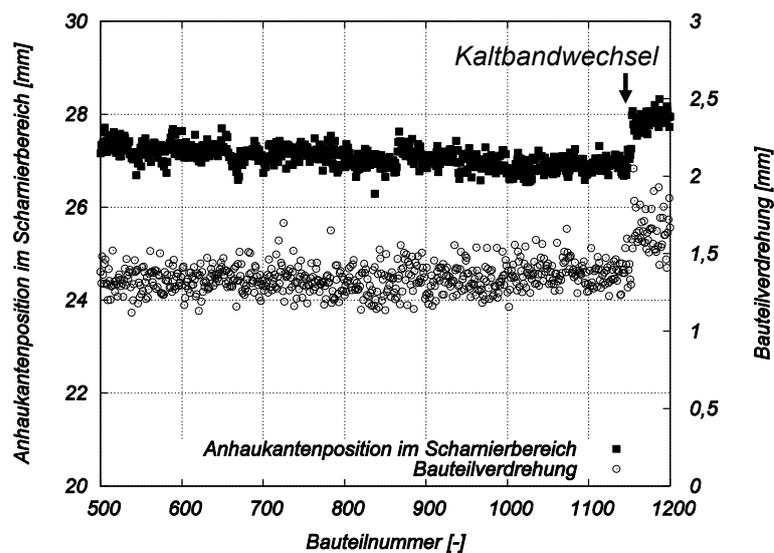


Abbildung 7.2: Prozessverläufe für Bauteilverdrehung und Scharnier-Anhaulante für die betrachtete Abpressung

Mit dieser präventiven Prozesskorrektur konnte das Auftreten von Reißern am Türinnenblech verhindert werden. Die Produktionskultur im Presswerk ist bislang auf die Ausbringung fokussiert. Zugunsten einer hohen Ausbringungsleistung ist es nicht üblich, Maschineneinstellungen zu verändern, bevor eindeutig identifizierbare Fehler am Bauteil auftreten. Folglich stellt die Nutzung von Inline-Messtechnik zur präventiven Prozesskorrektur eine gravierende Umstellung für das Presswerkpersonal dar. Neben der Bereitstellung dieser Technik für qualitätskritische Bauteile bedarf es zudem einer regelmäßigen Kontrolle durch die Bauteilverantwortlichen.

## 7.2 Passive Prozessüberwachung durch Anhaukantendetektion am Seitenrahmen

Die Ausprägung der Anhaukante ist vom Werkstoff und der Blechdicke abhängig. Es stellt sich somit die Frage, ob sie im Serienprozess auch an Bauteilen zuverlässig erkannt wird, deren Anhaukante schwächer sichtbar ist. Am Beispiel eines Seitenrahmens aus DX54 und einer Blechdicke von 0,7 mm wird die Übertragbarkeit untersucht. Seitenrahmen zählen aufgrund ihrer Geometrie zu den komplexesten Blechteilen der Automobilproduktion. Da sie gleichzeitig als Außenhaut- und Strukturbauteil dienen, müssen auch hohe Oberflächenanforderungen erfüllt werden. Nach Abbildung 7.3 treten Reißer im Serienprozess an drei unterschiedlichen Positionen auf. Welligkeiten im Einstiegsbereich am Übergang zur C-Säule wurden ebenfalls festgestellt.

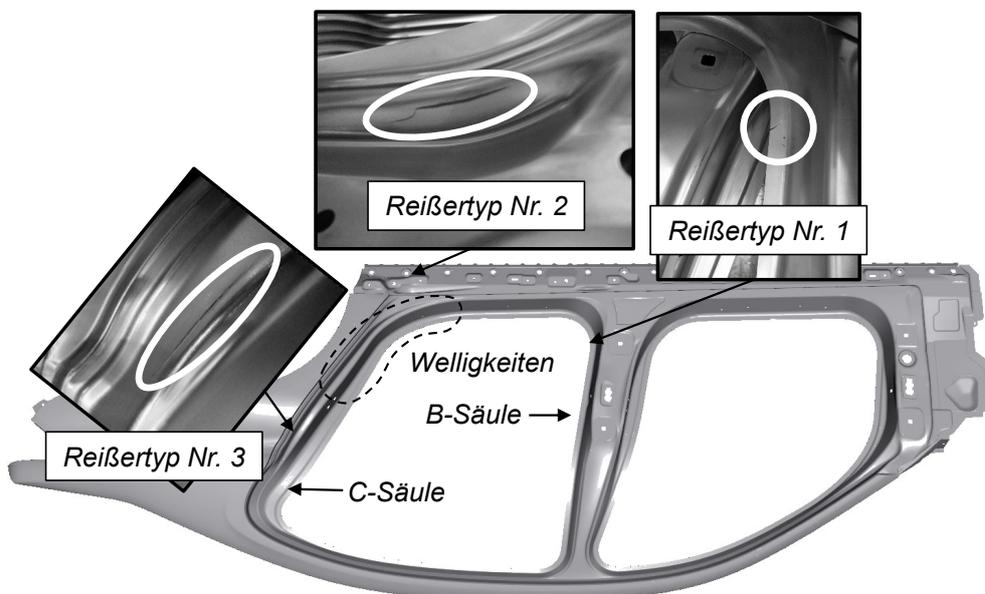


Abbildung 7.3: Linker Seitenrahmen mit qualitätskritischen Bereichen und Fehlerbildern

Zur Kontrolle dieser Fehlermerkmale wurden zwei Kameras, jeweils an den Übergängen von B- und C-Säule, in das Nachfolgewerkzeug montiert. Die Auswertebereiche, dargestellt in Ab-

bildung 7.4, ermöglichen die Auswertung eines Anhaukanten-Abstandes mit Bezug auf die Bauteilunterkante. In ihrem Verhalten stimmen die ermittelten Abstände also mit dem lokalen Einlaufweg überein. Größere Abstände resultieren aus einem höheren, lokalen Materialeinlauf. Zudem können starre Werkzeugkanten als Referenzmerkmal für beide Kameras kontrolliert werden.

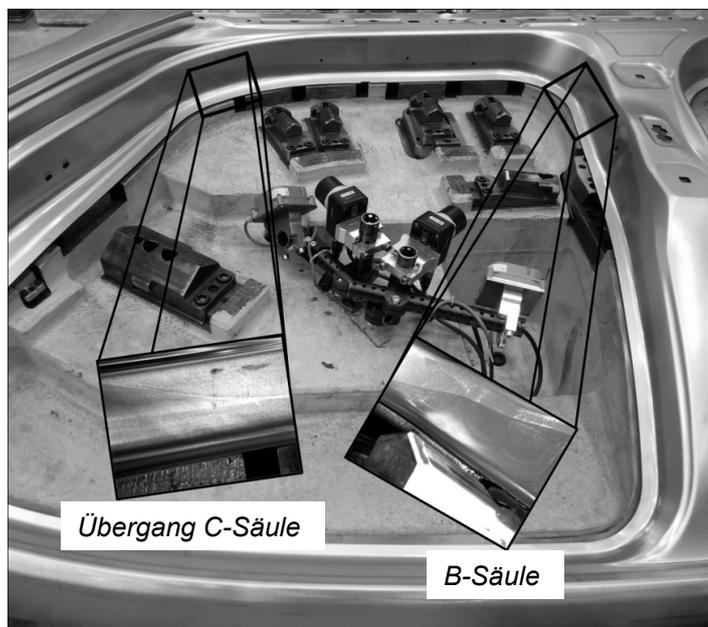


Abbildung 7.4: Aufbau des Kamerasystems zur Überwachung der Anhaukanten an den Übergängen von Einstieg zu B- und C-Säule

Die Visualisierungsoberfläche wurde für die Auswertung des Seitenrahmens angepasst und wird an der Produktionspresse für jeden Pressenhub aktualisiert. Sie ist beispielhaft in Abbildung 7.5 für eine Abpressung mit Reißern vom Typ 1, sogenannten Platzern im Flansch am Übergang zur B-Säule, dargestellt. Solche Reißer im Flanschbereich treten auf, wenn zu viel Material einläuft und somit die tangentialen Spannungen am Flanschradius zu groß werden. Folglich liegt die Anhaukante im B-Säulenbereich bei diesen fehlerhaften Bauteilen auch höher, es wurde also ein größerer Anhaukanten-Abstand detektiert. Bezüglich der Definition der Prozessgrenzen im Serienbetrieb empfiehlt es sich, diese nach Möglichkeit auf Basis fehlerfreier Abpressungen und der dort gewonnenen Datenbasis abzuleiten. Die so festgelegten Grenzen zeigen bei nachfolgenden Abpressungen unmittelbar auf, wenn der lokale Materialfluss von dieser Referenzabpressung abweicht. Analog zum Pilotsystem wird außerdem die Position der starren Referenzkanten für jeden Pressenhub kontrolliert und farblich visualisiert.

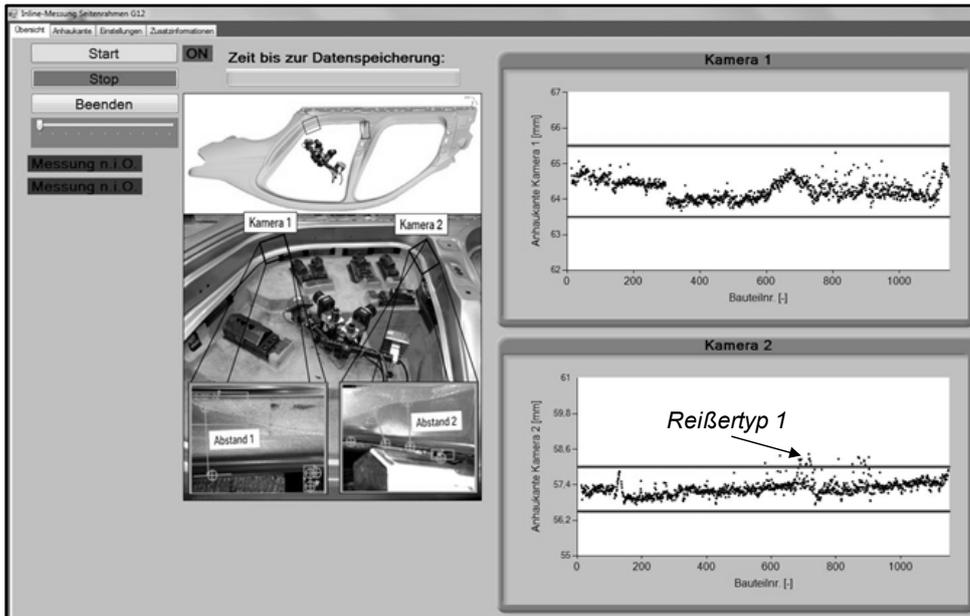


Abbildung 7.5: Angepasste Visualisierungsoberfläche zur Darstellung der Messergebnisse beider Kameras an der Presse, die Grenzwertüberschreitungen im Messverlauf von Kamera 2 können Bauteile mit Reißertyp 1 zugeordnet werden

Die Welligkeiten im Einstiegsbereich lassen sich über die Position der Anhaukante im C-Säulenbereich kontrollieren. Abbildung 7.6 stellt die gemessenen Abstände für diesen Bereich dar. Diese 1800 Bauteile stammen aus zwei unterschiedlichen Abpressungsterminen. Die ersten 1200 Bauteile wurden mit Zusatzbeölung in den Bereichen 1, 2 und 3 produziert, da im Vorfeld immer wieder Reißer vom Typ 3 im C-Säulenbereich aufgetreten sind. Bei diesen Bauteilen führte diese Zusatzbeölung zu größerem Materialeinlauf und folglich zur Bildung von Welligkeiten, welche für die 1200 Bauteile nicht korrigiert wurde. Von nachfolgenden Einheiten wurden später Welligkeiten reklamiert, welche im Vorfeld der nächsten Abpressung durch Wegnahme der Zusatzbeölung beseitigt wurden. Dabei zeigt die Inlinemessung großes Potential für die Fehleranalyse und -korrektur, da sie Prozessänderungen sowie deren Wirkung unmittelbar sichtbar machen. Während die Abstimmung der Zusatzbeölung im Innenbereich direkt zur Verringerung des Anhaukanten-Abstandes führte, konnte keine weitere Verbesserung durch die Wegnahme der äußeren Zusatzbeölung erzielt werden. Diese Änderungsmaßnahme hatte somit keine Wirkung auf den betrachteten Bauteilbereich und dessen Qualität. Eine Langzeitbetrachtung dieser Messposition zeigte, dass bereits bei vorherigen Abpressungen ähnliche Bauteilqualitäten ausgeliefert wurden (vgl. Abbildung A.8). Die Inlinemessung ermöglicht hier eine objektive Betrachtung der produzierten Bauteilqualität.

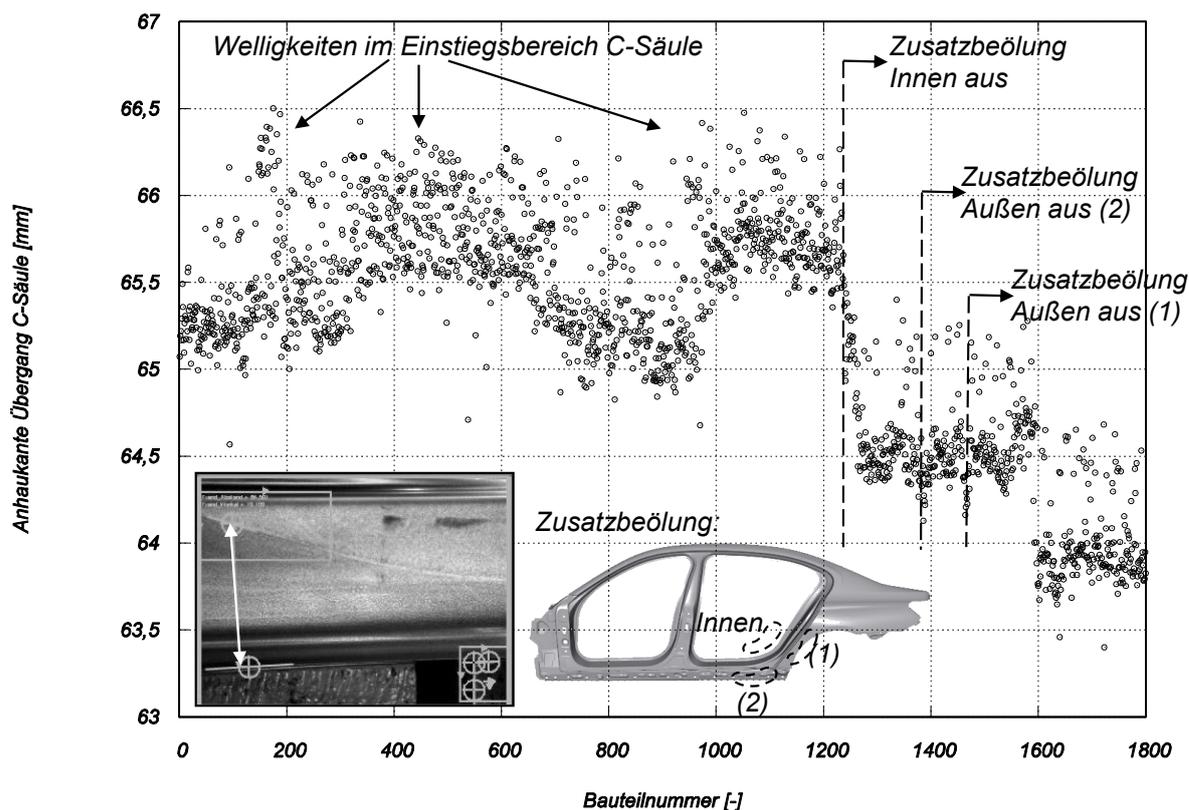


Abbildung 7.6: Identifikation von Welligkeiten am Seitenrahmen auf Basis der Inline-Messdaten

Anhand dieses Seitenrahmens konnte die Wirksamkeit der Anhaukantendetektion zur passiven Prozessüberwachung und Fehleranalyse dargestellt werden. Während die auftretenden Fehler in diesem Beispiel zur Festlegung der Kamerapositionen dienen, müssen für neue Bauteile im Vorfeld statistische FEM-Simulationen zur Entscheidungsfindung herangezogen werden. Sie ermöglichen eine tendenzielle Abschätzung der Auswirkungen typischer Schwankungen in den Eigenschaften des verarbeiteten Materials im Presswerk. Zudem wird deutlich, dass die erforderliche Messgenauigkeit einer Einlaufwegmessung gravierend vom Bauteiltyp und Messort abhängt, wie bereits von Annen (2012) aufgezeigt wurde. In den untersuchten Bereichen am Seitenrahmen entscheiden kleine Schwankungen der Anhaukantenpositionen von wenigen Millimetern über das Auftreten von Qualitätsfehlern. Die hohe Messgenauigkeit des entwickelten Messkonzeptes ermöglicht aber trotz allem eine eindeutige Fehleridentifikation. Würden sich Ungenauigkeiten aus dem Platinenschnitt oder ihrer Positionierung im Ziehwerkzeug überlagern, so wären an diesen Messpositionen keine exakten Versagensprognosen möglich.

Mit den beiden Kamerapositionen konnten somit Reißen und Welligkeiten, welche nahe dieser Analysebereiche auftreten, eindeutig identifiziert werden. Reißen vom Typ 3, welche in der Zar-

ge der C-Säule entstehen, zeigten sich ebenfalls in den Auswertungsergebnissen von Kamera 1. Diese Bauteile konnten jedoch nicht eindeutig von Gut-Bauteilen abgegrenzt werden. Die Anhaunkante bzw. der Stofffluss kann also nur eindeutige Qualitätsaussagen in nahen, umliegenden Bereichen geben.

### 7.3 Überwachung der Bauteilgeometrie für die Mehrfachteilefertigung

Während die Einbringung der Ausfräsungen im Pilotsystem rückwirkend erfolgte, wurden diese im Nachfolger (Türinnenblech 5er, 2016) bereits in der Planung und Konstruktion des Werkzeuges berücksichtigt. Die Einbringung dieser Taschen im Zuge regulärer Qualitätsschleifen im Werkzeugbau ist dadurch aufwandsarm. Entsprechend Abbildung 7.8 wurden die fünf Sensorpositionen analog zum Pilotsystem festgelegt. Durch die Verwendung von Lasersensoren konnte die Position am Fensterrahmen (G2) nahe des Messraum-Messpunktes gewählt werden. Zudem wurden an den Positionen R1 und R2 ebenfalls Lasersensoren eingeplant, da diese einen deutlich größeren Messbereich an den sensitiven Messpunkten gewährleisten. Im Gegensatz zum Pilotsystem werden an dessen Nachfolger beide Seiten des Türinnenbleches durch Sensoren kontrolliert. Die Geometriemessung umfasst somit, zusammen mit dem Laser-Distanz-Sensor der die Position des Oberteils erfasst, insgesamt elf Abstandssensoren. Zusätzlich wurden zwei Kameras zur Kontrolle der Einlaufwege in den Schlossbereichen installiert.

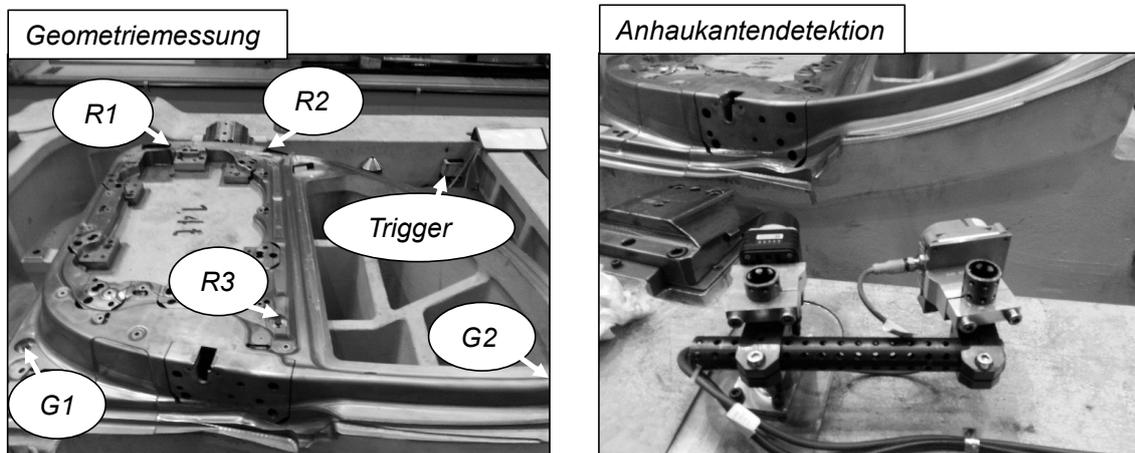


Abbildung 7.7: Sensoren zur Geometrie- und Einlaufwegmessung am Nachfolgewerkzeug des Türinnenbleches (5er 2016)

In der Visualisierung werden nun die Messergebnisse beider Seiten in einem Diagramm dargestellt. Liegen die Verläufe für die gemessene Bauteilverdrehung übereinander, so sind die Türinnenbleche in ihrer makroskopischen Gestalt ähnlich. Ziel einer nachvollziehbaren, hochwer-

tigen Doppelteilproduktion muss es sein, die spiegelbildlichen Bauteile möglichst in gleicher Qualität und innerhalb derselben Prozessgrenzen zu fertigen. Dies kann durch die Überwachung beider Seiten und der analogen Auswertung ihrer Messergebnisse geschehen. Abbildung 4.5 zeigt die ermittelten Bauteilverdrehungen von jeweils 1600 linken und rechten Türinnenblechen aus einer Abpressung. Beide Türseiten wurden in ihrer Rückfederung soweit angepasst, dass diese ähnliche Bauteilverdrehungen aufweisen. Ebenso sind die festgelegten Prozessgrenzen identisch. Diese liegen zwischen 0,5 und 3 mm für beide Seiten. Die hier exemplarisch dargestellte Betrachtung zeigt außerdem größere Schwankungen am linken Türinnenblech. Analog zum Pilotsystem ergibt sich auch hier für beide Bauteilseiten ein enger Zusammenhang zwischen der Anhaukantenposition im Schlossbereich und der Bauteilrückfederung. Alle Messergebnisse einer beispielhaften Abpressung sind in Abbildung A.9 aufgetragen.

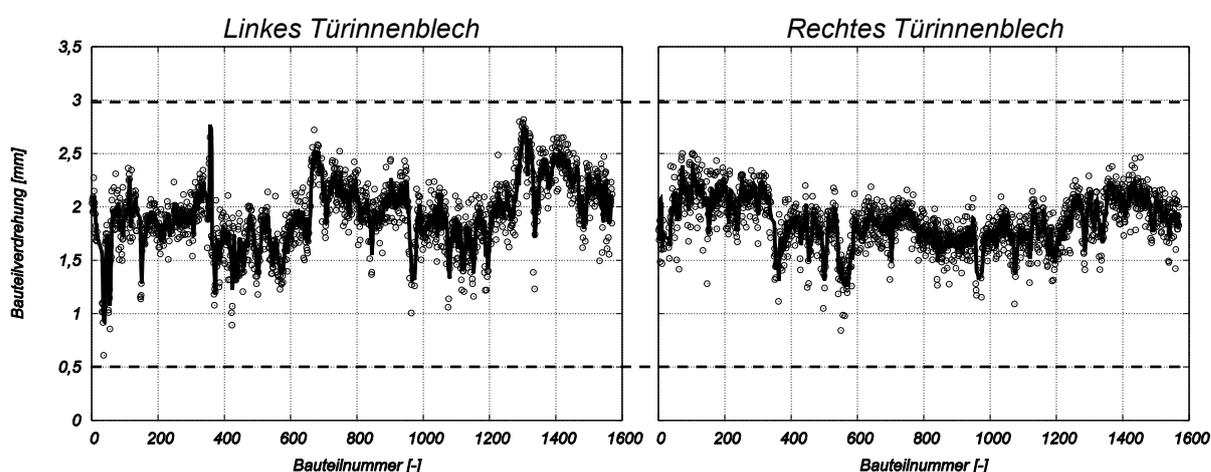


Abbildung 7.8: Gemessene Bauteilverdrehungen an linken und rechten Türinnenblechen einer Abpressung

Die Festlegung von Prozessgrenzen bezüglich der Rückfederung und ihrem Einfluss auf die Verarbeitbarkeit des Einzelteils in Nachfolgeprozessen ist in diesem Zusammenhang komplex. Eine Vielzahl von Einzelteilen und ihre spezifischen Maßabweichungen bestimmen die Geometrie des Zusammenbaus. Zwar kann am Beispiel der Tür davon ausgegangen werden, dass Türinnenbleche einen wesentlichen Einfluss auf die fertige Tür ausüben, jedoch konnten auch hier keine exakten Grenzen ausgelotet werden. Je nach Gestalt der restlichen Fügepartner, wie Türverstärkung, Scharnierträger und Verstärkungsbleche ergeben sich für das betrachtete Türinnenblech andere Sollvorgaben. Wiederrum ist ein pragmatischer Ansatz für den aktuellen Presswerksbetrieb die Vorgabe fester Grenzen. Diese stellen eine gleichbleibende, homogene Einzelteilqualität sicher.

## 7.4 Nutzung von Inline-Messtechnik im Einarbeitungsprozess

Bislang wurde die Inline-Messtechnik lediglich zur Überwachung des Serienprozesses im Presswerk eingesetzt. Neben der Anwendung im Presswerk können bereits zur Werkzeugeinarbeit, lange vor dem eigentlichen Produktionsbetrieb, Messdaten generiert werden. Abbildung 7.9 gibt einen Überblick von der Planung bis zur Produktion. So besteht die Möglichkeit, die aus der Simulation generierten Bauteil-Solldaten mit den aus der Einarbeit gemessenen Messdaten zu vergleichen und darauf aufbauend Handlungsempfehlungen abzuleiten. Somit kann ein objektiver Abgleich zwischen Simulation und Realität stattfinden. Wiederum können die Einarbeitsdaten des Bauteils aus dem Werkzeugbau mit denen aus der Produktionspresse verglichen werden. Pressenbedingte Unterschiede im Einlaufverhalten des Bauteils werden sichtbar.

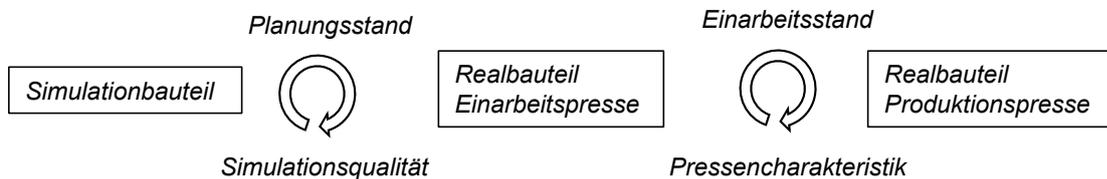


Abbildung 7.9: Informationsfluss von der Simulation bis zur Produktion

Ziel des Einarbeitungsprozesses muss es sein, die Werkzeuge so zu gestalten, dass fehlerfreie Bauteile in einem möglichst robusten Produktionsprozess hergestellt werden können. Aktuell gibt es in diesem Prozess, mit Ausnahme der geometrischen Maßhaltigkeit der Bauteile, noch keine messbaren Zielgrößen. Zur Einarbeitung robuster Ziehwerkzeuge muss der bisherige Einarbeitsprozess systematisiert werden. Eine Möglichkeit ist die stufenweise Einarbeitung mit Fokus auf dem Prozessfenster:

- Erfassung des aktuellen Prozessfensters an der Produktionspresse, innerhalb dessen fehlerfreie Bauteile produzierbar sind.
- Ableitung und Umsetzung von Änderungsmaßnahmen zur Vergrößerung dieses Prozessfensters im Werkzeugbau.
- Nachweis der Wirksamkeit dieser Maßnahmen durch Erfassung des neuen Prozessfensters an der Produktionspresse.

Der Einsatz von Inline-Messtechnik bereits im Einarbeitsprozess ermöglicht die Aufnahme dieses Prozessfensters, sofern eine systematische Vorgehensweise bei der Einarbeit eingehalten wird. Exemplarisch soll das reale Prozessfenster für ein hinteres Türinnenblech während einer Einarbeit ermittelt werden. Entsprechend Abbildung 7.10 erfolgt die Montage der Kameras

zur Anhaukantendetektion dafür auf dem Blechhalter des Ziehwerkzeuges, da zur Einarbeit im Werkzeugbau meist nur Ziehteile hergestellt werden. Während am Fertigbauteil zur Orientierung gestanzte Elemente, wie beispielsweise Löcher, dienen, muss am Stempel ein Referenzmuster aufgebracht werden. Dieses Muster existiert in der CAD-Konstruktion und ermöglicht somit den Abgleich zwischen Simulation und Fertigteil.

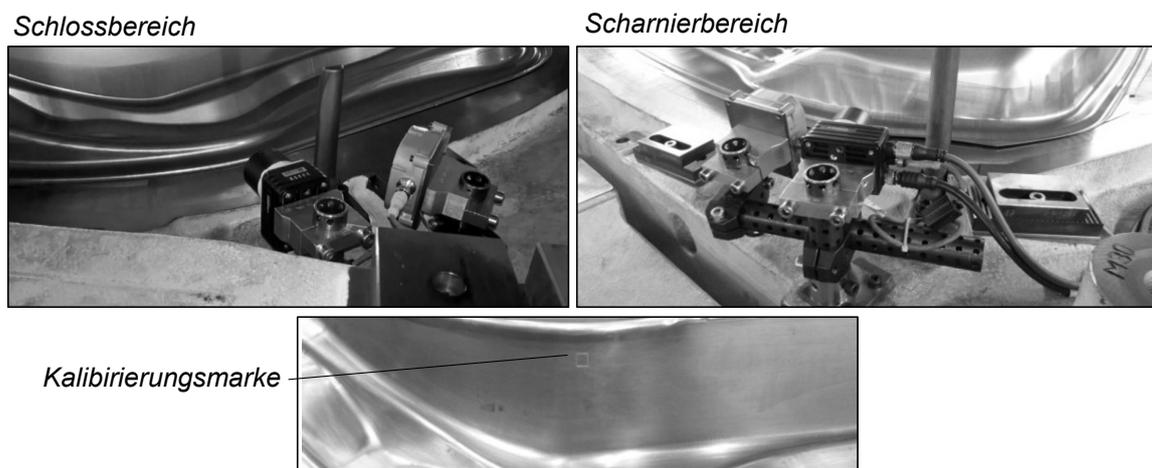


Abbildung 7.10: Integration der Sensorkameras auf dem Blechhalter eines Ziehwerkzeuges

Für den Schlossbereich des betrachteten Türinnenbleches wird die Lage der Anhaukante aus der Simulation über deren Abstand zur Bauteiloberkante gemessen. Analog erfolgt die Auswertung dieses Abstandes am realen Ziehteil während der Einarbeit durch die Kameras nach Abbildung 7.11. Die herkömmliche Messung der Anhaukantenposition mittels Stahllineal ist vergleichsweise schwierig, da stets von einem Radiusauslauf gemessen wird. Der Fehler infolge der subjektiven Wahrnehmung des Radiusauslaufes führt zu großen Messungenauigkeiten. Außerdem wird durch die Kameras für jedes produzierte Bauteil ein entsprechendes Bild gespeichert und dadurch dokumentiert.

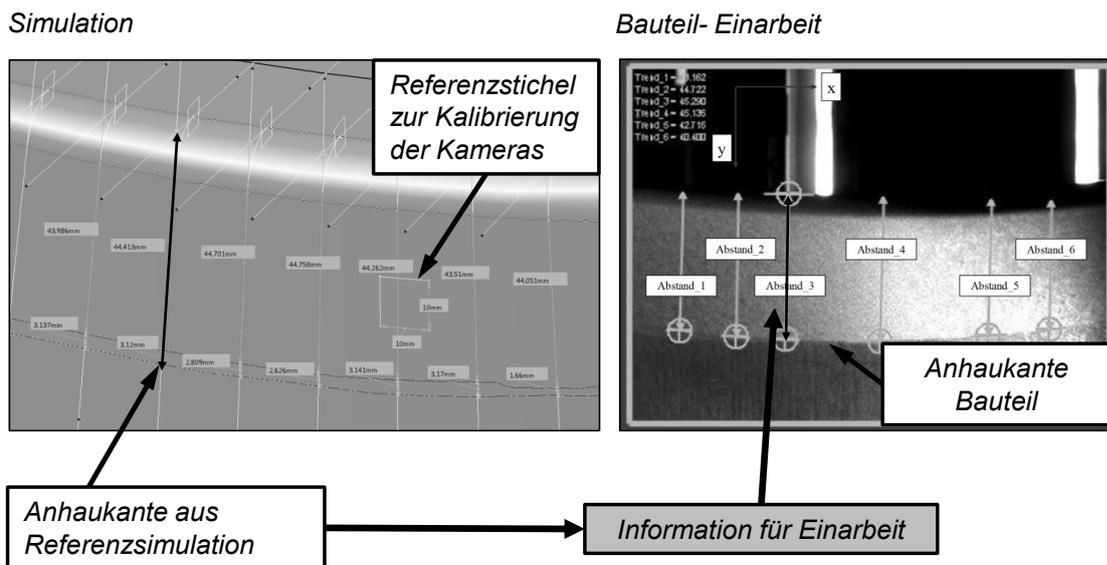


Abbildung 7.11: Abgleich zwischen der Positionen der Anhaukante im Schlossbereich des Türinnenbleches aus Simulation und Einarbeitsbauteil

Die Anhaukante des Bauteils ermöglicht einen direkten Vergleich zwischen Simulation und Realität. Für das Türinnenblech aus DX54 und einer Blechdicke von 0,8 mm ergibt eine Umformsimulation mit konstanter Reibzahl von 0,12 einen Anhaukanten-Abstand im Bereich Nr. 3 von 47,5 mm. Zum Vergleich liefert eine Simulation mit variablem, druckabhängigem Reibzahlmodell einen um 3,1 mm kleineren Wert, der Einlaufweg ist folglich größer. Diese beiden Referenzwerte dienen als Führungsgröße für den Einarbeitsprozess im Werkzeugbau.

Der materielle Werkzeugentstehungsprozess beginnt mit der gießtechnischen Herstellung der einzelnen Werkzeugkomponenten. Sämtliche Funktionsflächen des Werkzeuges werden anschließend überfräst und geschliffen. Die erste Einarbeit im Werkzeugbau beschäftigt sich mit der Tuschierung von Blechhalter und Matrice um ein gleichmäßiges Tragbild zu gewährleisten. Sobald ein vollständiges Ziehteil umgeformt wurde, kann ein Abgleich zwischen Simulation und Realität durchgeführt werden. Am Beispiel des hier betrachteten Türinnenbleches erfolgt die erste messtechnische Begleitung einer Einarbeit an der Produktionspresse im Presswerk Regensburg. Es folgten Korrekturschleifen im Werkzeugbau (Werk Dingolfing) sowie eine weitere Einarbeit im Presswerk (Werk Regensburg). Sämtliche Messergebnisse für den Schlossbereich sind zusammen mit den Richtwerten aus der Simulation in Abbildung 7.12 veranschaulicht.

In der ersten Einarbeit wurden keine Korrekturmaßnahmen abgeleitet, sie dient lediglich zur Aufnahme einer Datenbasis. Im Schlossbereich ergab sich eine gute Übereinstimmung der produzierten Bauteile mit der Simulation mit variablen Reibzahlmodell und einem Wert von ca.

44 mm. Diese Übereinstimmung ist keinesfalls allgemeingültig, sondern wird nur für die in dieser Einarbeit eingesetzten Materialcharge und Maschineneinstellungen erzielt. Sie liefert somit keinen Aufschluss über die Robustheit des Werkzeuges. Da die produzierten Bauteile fehlerfrei waren, wird in der Praxis häufig ein voreiliges Urteil über die Robustheit des Produktionsprozesses getroffen.

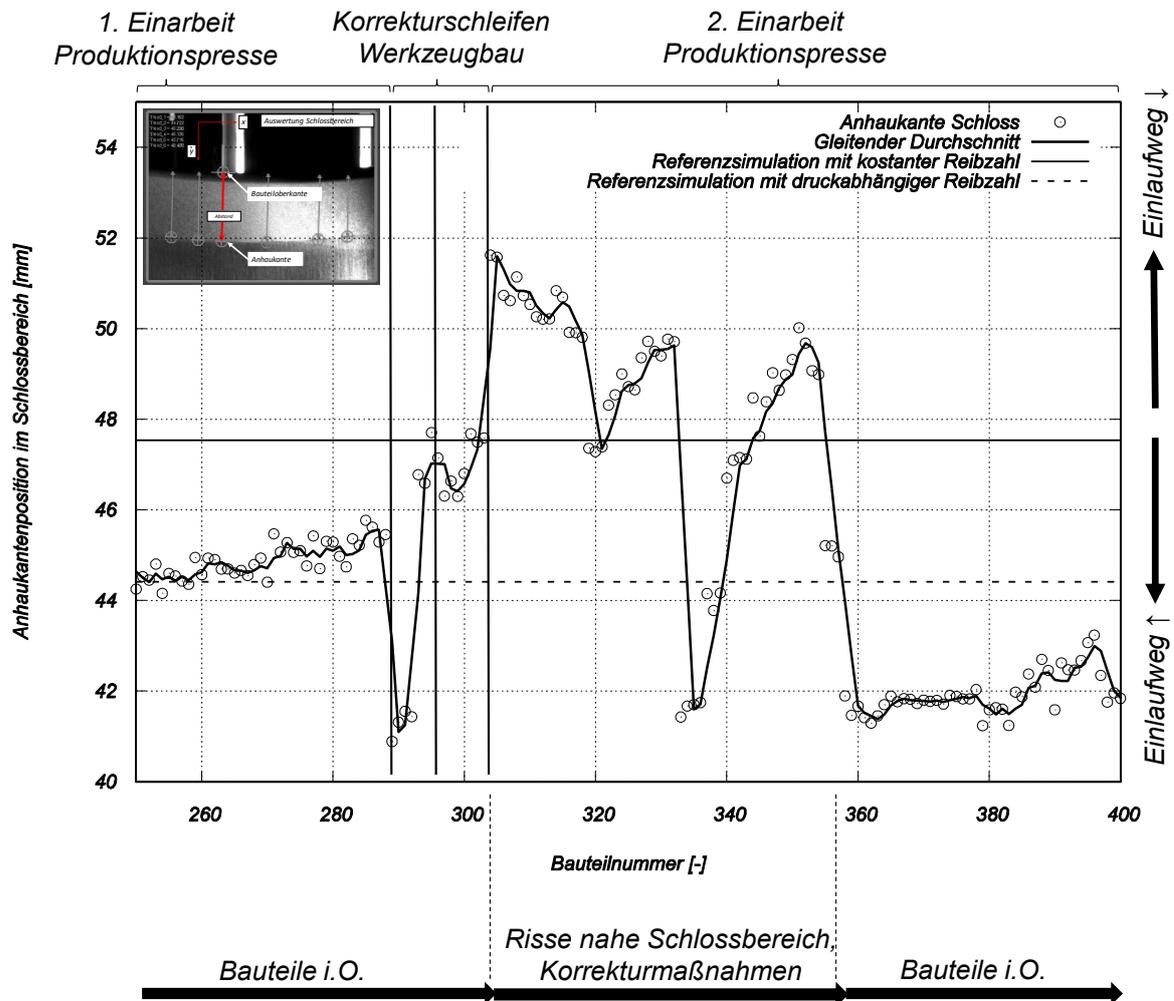


Abbildung 7.12: Auswertung der Anhaukantenposition im Schlossbereich eines Türinnenbleches über mehrere Einarbeitstermine an Produktions- und Versuchspressen

Nach kleineren Korrekturen im Werkzeugbau erfolgte die zweite Einarbeit an der Produktionspresse in Regensburg mit gleichen Maschineneinstellungen aber einer anderen Materialcharge. Verschiedene Bauteilfehler, welche der Abbildung 7.13 entnommen werden können, traten jetzt an den Bauteilen auf. Zu Beginn dieser Einarbeit konnten Anhaukanten-Abstände im Schlossbereich gemessen werden, welche im Vergleich zur ersten Einarbeit um ca. 10 mm größer, also stärker abgestreckt, sind. Diese Messwerte stehen im Zusammenhang mit den auftretenden Reißern (a) im Schlossbereich. Neben der Anpassung der Platinenposition durch die Einweiser

und der Distanzen war die Reduzierung der Blechhalterkraft pro Zylinder von 360 auf 270 kN eine wesentliche Maßnahme zur Prozesskorrektur. Der resultierende Abstand verschiebt sich dadurch auf einen Wert von ca. 42 mm. Es treten dadurch keine Reißer mehr im Bereich des Schlosses auf, jedoch führt der vergrößerte Einlaufweg zur Faltenbildung. Diese bremsen den Materialfluss in der Ziehsicke im Schwellerbereich und führen dort zur Entstehung von neuen Reißern (b).

Bereits zu diesem Zeitpunkt erschließt sich durch die objektive Messung und Dokumentation der Anhaulante ein Prozessfenster für dieses Werkzeug. Die erste Einarbeit zeigte, mit welchen Werten fehlerfreie Bauteile produziert werden können. Das Fehlerbild, welches sich bei Überschreitung der oberen und unteren Grenze ergibt, ist nun ebenfalls bekannt. Durch weitere Anpassungen der Blechhalterkraft, schließlich auf einen Wert pro Zylinder von 330 kN, konnte der Bauteilstatus aus der ersten Einarbeit wieder erreicht werden. Obwohl die Bauteile mit dieser Einstellung bereits fehlerfrei waren, wurde noch die Zusatzbeölung flächig mit  $0,5 \frac{g}{m^2}$  aktiviert.

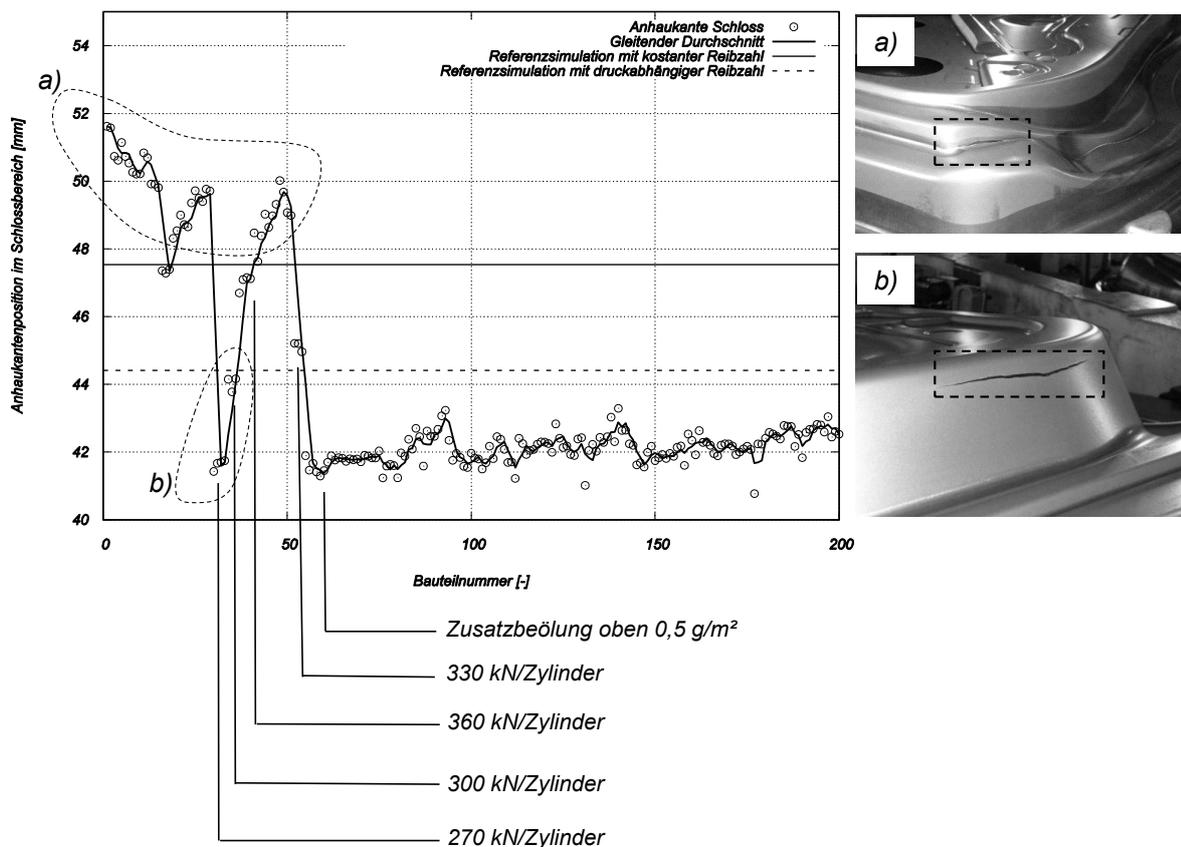


Abbildung 7.13: Verlauf der Anhaulantenposition für die zweite Einarbeit an der Produktionspresse

Allein durch die Messung der Anhaulante im Schlossbereich konnten, bei hohem Material-einlauf, Fehler im benachbarten Schwellerbereich vorhergesagt werden. Mit dem Einschalten der Zusatzbeölung und ihrer komplexen Auswirkung ist dies nicht mehr möglich. Es kann nur noch die Aussage getroffen werden, dass im Schlossbereich vergleichsweise viel Material einläuft und dadurch die dortigen Reißer nicht auftreten. Jedoch lässt sich ein anderer Effekt der Zusatzbeölung beobachten. Zu Beginn der zweiten Einarbeit wurden, wie beschrieben, im ersten Schritt die Distanzen und Einweiser angepasst. Daraufhin konnten drei fehlerfreie Bauteile im Einzelhub hergestellt werden. Anschließend wurde im Dauerhub von 17 Hüben pro Minute produziert. Ein rasches Ansteigen des Anhaulanten-Abstandes kann dabei festgestellt werden. Über die acht produzierten Bauteile steigt der Abstand um 2 mm, die Abstreckung nimmt zu. Ebenfalls treten sofort wieder Reißer im Schlossbereich auf (vgl. Abbildung A.10). Nach der Verstellung der Blechhalterkräfte, vor der Einstellung von 330 kN pro Zylinder, wiederholte sich dieser Ablauf nochmals. Wieder wurden vier fehlerfreie Bauteile im Einzelhub produziert, anschließend traten fehlerhafte Teile im Serienbetrieb auf. Der rasche Anstieg des Anhaulanten-Abstandes im Schlossbereich im Dauerhub steht mit der sich entwickelnden Temperatur in Zusammenhang. Die Zusatzbeölung wirkt diesbezüglich wie ein Kühlschmierstoff. Nach ihrem Einschalten kann der Anstieg des Abstandes nicht mehr nach wenigen Bauteilen erkannt werden. Jedoch ist ein langsames, kontinuierliches Ansteigen über eine größere Anzahl an Bauteilen beobachtbar. Diese Betrachtung zeigt, dass mit der Inline-Messtechnik in der Werkzeugeinarbeit ein tiefgreifendes Verständnis über die Produktionsprozesse entsteht. Dieses dokumentierte Wissen sollte, zusammen mit dem eingearbeiteten Werkzeug, an das Presswerk übergeben werden.

Mit dem vorhandenen Wissen über den aktuellen Werkzeugstand können nun Verbesserungsmaßnahmen eingeleitet und deren Wirkung nachgewiesen werden. Bezüglich des Abgleiches zwischen Simulation und Realität ist die Betrachtung eines einzigen Simulationsergebnisses schwierig, da bereits die Grundstreuung im Produktionsprozess sich über mehrere Millimeter erstreckt. Vielmehr muss durch die Nutzung statistischer FEM-Tools in Zukunft ein virtuelles Prozessfenster abgeleitet und mit dem realen Prozessfenster verglichen werden. Bei hinreichender Übereinstimmung könnten Werkzeugverbesserungen bereits in der Simulation hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Prozessrobustheit bewertet werden.

## **7.5 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für den Serieneinsatz**

Am Beispiel der werkzeugintegrierten Anhaulantenüberwachung werden die Aufwände und Einsparungspotentiale nachfolgend gegenübergestellt. Im Idealfall beginnt die Planung eines

solchen Systems bereits bei der Methodenplanung. In dieser Phase wird die Herstellbarkeit der Bauteile mittels Simulationen überprüft. Hier sollten die signifikanten Anbauanteipositionen am Bauteil identifiziert werden, etwa durch statistische Softwaretools. Diese Information wird an den Werkzeugkonstrukteur übergeben. Er plant die im Guss der Werkzeuge notwendigen Ausfräsungen ein, um später Sensoren ohne großen Mehraufwand integrieren zu können. Im regulären Fräßprozess der Werkzeuge könnten diese Ausfräsungen so kostenneutral mit-eingebracht werden. Die Einbringung der Sensoren ins Werkzeug kann zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfolgen. Sollen Werkzeugearbeiten unterstützt werden, so kann die Integration im Rahmen der Werkzeugherstellung hergestellt werden. Da viele Qualitätsprobleme erst im Serienbetrieb im Presswerk, den schwankenden Coil-Chargen geschuldet, identifiziert werden, kann auch das Presswerk bei Bedarf Sensorik nachrüsten. Entscheidend ist die Einplanung der Ausfräsungen im Werkzeug im Werkzeugentstehungsprozess. Rückwirkend ist die Einbringung solcher Taschen stets mit hohem Aufwand verbunden. Die eingesetzten Sensorsysteme hingegen müssen weitgehend standardisiert und als Fertigbaugruppen gekauft werden können. Mit der zunehmenden Automatisierung des gesamten Werkzeugherstellungsprozesses werden Werkzeugmacher aus Presswerk und Werkzeugbau zukünftig ein anderes Aufgabenprofil erhalten. Zur Werkzeugoptimierung wird auch die Einstellung solcher Sensorsysteme zählen, welche die Basis für eine umfassende Datenanalyse im Sinne einer Indurstie 4.0 bilden.

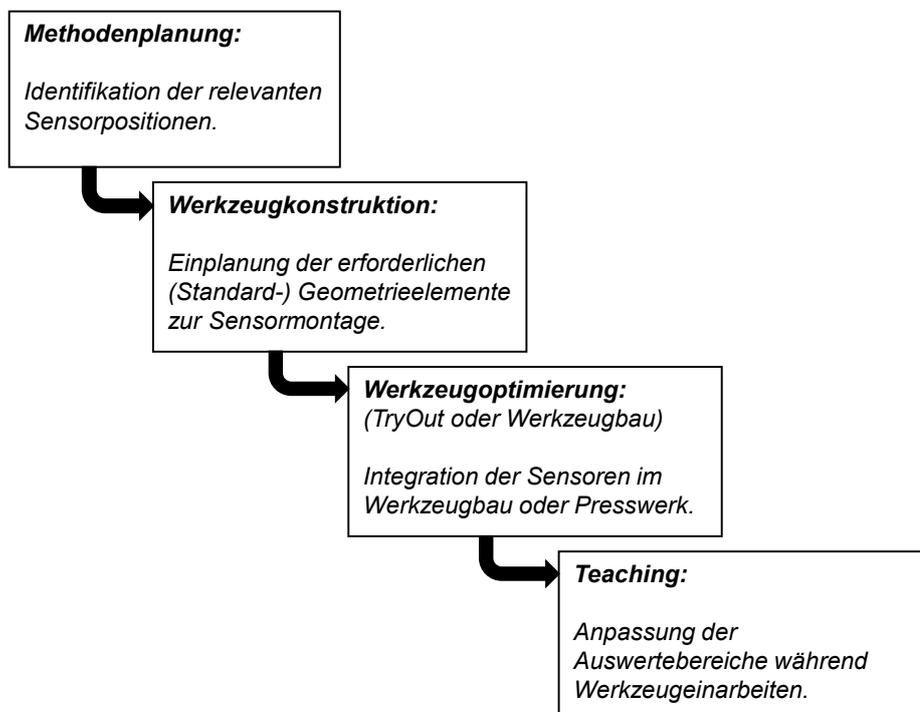


Abbildung 7.14: Einplanung von werkzeugintegrierter Inline-Messtechnik im Werkzeugentstehungsprozess

In diesem Kapitel wurden Anwendungspotentiale der Inline-Messtechnik am Beispiel ausgewählter Bauteile aufgezeigt. Im Zuge einer Kosten-Nutzen-Abschätzung ergeben sich für Presswerke nachfolgende Einsparungen:

- Reduzierung von Ausschusskosten,
- Vermeidung von Fehlerfolgekosten aufgrund von Fehlerschlupf und
- Einsparung von Nachkontrollen oder aufwändiger Sortieraktionen.

Insbesondere die Einsparung von Nachkontrollen oder Sortieraktionen ist für Presswerke von hoher wirtschaftlicher Bedeutung. Besonders fehleranfällige Bauteile werden nach jeder Abpressung manuell nach Fehlern kontrolliert. Dabei wird jedes Bauteil erneut im Lager aus den Behältern genommen und betrachtet. Ohne diese Kontrolle würden fehlerhafte Bauteile vermehrt in Karossen verbaut werden und zu hohen Kosten führen. Abbildung 7.15 stellt die Aufwände für die Beschaffung eines Inline-Systems mit denen einer manuellen Nachkontrolle gegenüber. Bei einer Bauteillosgröße von 5000 Bauteilen pro Woche und Nachkontrollkosten von 1 € pro Bauteil ergeben sich laufende Nachkontrollkosten von 5000 € pro Woche für dieses Bauteil. Dem gegenüber stehen einmalige Kosten für die Beschaffung der Sensorik. Für ein System mit vier Kameras werden im Beispiel Einmalkosten für Einkauf und Integration von 20000 € berechnet (Kalkulation aus 2017). Instandhaltungsmaßnahmen sind durch laufende Kosten von 200 € pro Woche in der Kalkulation berücksichtigt.

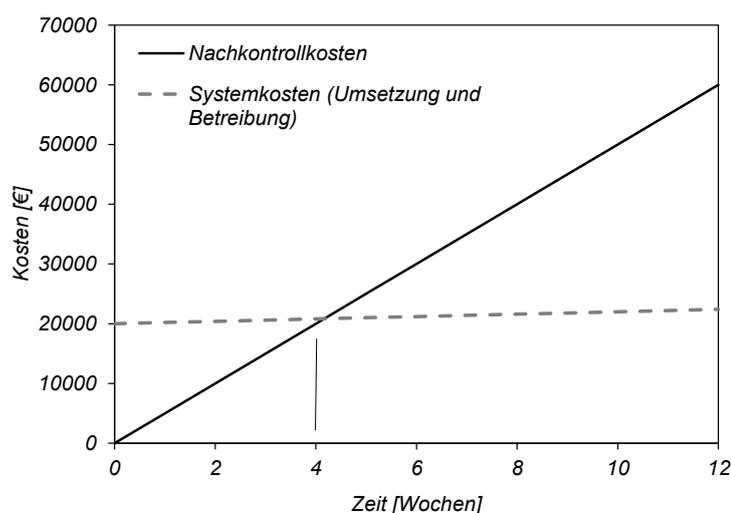


Abbildung 7.15: Gegenüberstellung der laufenden Kosten für die Nachkontrolle eines Bauteils mit einer Losgröße von 5000 Stück pro Woche und einem Inline-System mit vier Kameras

Aufgrund der hohen, manuellen Nachkontrollkosten tritt eine Amortisierung des Inline-Systems bereits nach vier Wochen ein. Ohne weitere Einsparungspotentiale, wie die Ausschusskostenreduzierung, zu berücksichtigen ergibt sich so bereits ein hoher wirtschaftlicher Nutzen für Presswerke. Neben der wirtschaftlichen Vorteile führt dies auch zur Steigerung der Direktläuferquote in Presswerken, also dem Verhältnis der Menge produzierter Bauteile ohne zusätzlicher Mehraufwände zum gesamten Produktionsumfang.

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Qualitativ hochwertige Karosserieteile sind frei von Falten und Reißern, weisen eine makellose Oberfläche auf und erfüllen hohe Anforderungen an ihre Maßhaltigkeit. Aktuell erfolgt die Prüfung dieser Qualitätskriterien im Presswerk visuell durch Fachkräfte am Auslaufband. Die Maßhaltigkeit wird stichprobenartig an wenigen Bauteilen in Messräumen kontrolliert.

Trotz zahlreicher Vorarbeiten zur Inline-Prozessüberwachung im Umformprozess existiert bis heute kein etablierter Stand der Technik im Presswerk. Ein presswerkstaugliches System muss einfach zu integrieren, robust und wartungsarm sein. Um dieses Ziel zu erreichen, werden in dieser Arbeit neue Konzepte zur Prozessüberwachung innerhalb von Nachfolgewerkzeugen untersucht. Nachfolgewerkzeuge ermöglichen eine vergleichsweise einfache Integration von Sensorik, diese sind dort einfacher zugänglich und somit wartungsfreundlicher.

Da die Bauteilgeometrie bisher nur stichprobenartig überprüft wird, werden Prozessänderungen und deren Wirkung auf die Geometrie häufig nicht rechtzeitig erkannt. Diese Schwankungen können Probleme in nachgeschalteten Fügeprozessen oder der Fahrzeugmontage verursachen, welche zu aufwändigen Nacharbeiten führen. Eine Zielsetzung der Arbeit ist daher die Entwicklung eines Konzeptes zur Kontrolle ausgewählter geometrischer Merkmale in Nachfolgewerkzeugen. Grundidee ist die Integration kleiner Abstandssensoren an sinnvollen Punkten im Aufsatz. Diese Messen den Abstand des Bauteils vom Aufsatz nach dem ffnen des Werkzeuges, nachdem sich das Bauteil entspannen konnte. ber eine Koordinatentransformation werden Ungenauigkeiten dieser freien Bauteilausrichtung kompensiert. Außerdem ermöglicht sie eine direkte Vergleichbarkeit der Inline-Geometriemessung mit der Offline-Messraummessung. Im Serienprozess konnte die Funktionsfähigkeit dieses Messkonzeptes am Beispiel eines Türinnenbleches nachgewiesen werden. Insbesondere die Kontrolle der Systemfähigkeit durch Messung der Bauteilgeometrie im geschlossenen Werkzeug, für jeden Pressenhub, spricht für die Tauglichkeit dieses Systems. Es zeigte sich außerdem ein systematischer Zusammenhang zwischen den Einzelmesswerten der Abstandssensoren und der berechneten Bauteilgeometrie.

Ein weiterer, vielversprechender Ansatz ist die Kontrolle des Einlaufweges der Platine beim Umformen. Diese Prozessgröße spiegelt die Eingangsgrößen der Platine, wie Schmierung oder mechanische Eigenschaften, sowie Maschineneinstellungen wieder. So treten Reißer am Bauteil bei vergleichsweise kleinen Einlaufwegen, also bei stärkerer Rückhaltung der Platine, auf. Der Einlaufweg am Fertigteil bzw. im Nachfolgewerkzeug kann über die Position der Anhaulante gemessen werden. Sie zeichnet sich am ersten Kontaktpunkt zwischen Platine und Werkzeugradius ab und wandert während der Umformung. Ungenauigkeiten beim Einlegen der Platine ins

Ziehwerkzeug können dadurch umgangen werden. Um die Anhaulante im Serienprozess zu erfassen, wurden Sensorkameras und deren Beleuchtung in das Nachfolgewerkzeug montiert. Die Messpunkte aus Scharnier- und Schlossbereich wurden im Vorfeld über simulationsgestützte Sensitivitätsanalysen ermittelt. Durch die zusätzliche Erfassung starrer Werkzeugkanten kann die Systemfähigkeit während der Abpressungen kontrolliert werden. Erstmals wurde somit ein serientaugliches Messkonzept zur Einlaufwegmessung innerer Bauteilbereiche umgesetzt.

Eine Visualisierungsoberfläche zeigt die aktuellen Ergebnisse beider Messsysteme für jeden Pressenhub. Über diese Visualisierung erhalten die Fertigungsmitarbeiter Informationen über den aktuellen Prozessverlauf und können rechtzeitig Gegenmaßnahmen einsteuern. Zudem werden die Referenzmessungen durch diese Oberfläche ausgewertet, sie gibt dem Mitarbeiter eine Information zum Systemstatus. Somit wurden zwei Systeme am Beispiel eines Türinnenbleches für den Serienbetrieb validiert und befähigt.

Die Wirkung dieser Inline-Messsysteme im Presswerksbetrieb hängt von ihrem Einbettungsgrad ab. Im einfachsten Fall dienen die aufgenommenen Messwerte zur rückwirkenden Fehleranalyse. Tiefgreifender ist die Ableitung präventiver Handlungsempfehlungen im laufenden Produktionsbetrieb. Als höchste Integrationsstufe gilt der bereichsübergreifende Einsatz der so generierten Prozessinformationen, beispielsweise im Vorfeld der Serienproduktion bei der Werkzeugeinarbeit. Im Rahmen dieser Arbeit wurden unterschiedliche Anwendungsbeispiele aus diesen Potentialfeldern für reale Karosseriebauteile aufgezeigt.

Durch die kaltbandreine Verarbeitung der Platinenstapel verlaufen die gemessenen Größen kontinuierlich, dies ermöglicht eine einfachere Steuerung des Produktionsprozesses. Beispielhaft wurde der Einlaufweg im Schlossbereich durch die lokale Verstellung der Blechhalterkraft am Türinnenblech korrigiert. So konnten auftretende Reißen präventiv verhindert werden. Für einen erfolgreichen Serieneinsatz ist außerdem ein Übertragbarkeitsnachweis erforderlich. Da die Ausprägung der Anhaulante vom Material und dessen Blechdicke abhängt, wurde ein Seitenrahmen aus DX54 mit einer Blechdicke von 0,7 mm zur Übertragbarkeitsstudie ausgewählt. Fehler traten dort bevorzugt an den inneren Übergängen des Einstiegs zu B- und C-Säule auf. Dort wurde jeweils ein Kamerasystem integriert. Insgesamt konnte eine serientaugliche Überwachung des Einlaufweges nachgewiesen werden. So konnten diese Fehlertypen durch die rückwirkende Fehleranalyse identifiziert und zukünftig vermieden werden. Zur Herstellung spiegelbildlicher Mehrfachteile wurde im Nachfolgerbauteil des Pilotsystems die Rückfederung sowohl am linken als auch am rechten Türinnenblech gemessen. Beide Seiten weisen dieselben Grenzen bezüglich ihrer Rückfederung auf, eine qualitativ hochwertige Produktion wird dadurch sichergestellt. Neben der Überwachung des Produktionsprozesses wurde das Potential

der Anhaulantendetektion für die Werkzeugeinarbeit untersucht. Am Beispiel eines hinteren Türinnenbleches können mit ihr objektive Vergleiche zwischen Simulations- und Einarbeitsbauteil erbracht werden. Prozessfenster lassen sich so für das Ziehwerkzeug ermitteln. Diese geben gleichzeitig einen Rückschluss auf die Robustheit des Herstellungsprozesses. Ein Vorschlag zur systematischen Einarbeitung auf Basis dieser Prozessfenster wurde beschrieben.

### **Ausblick**

Naheliegender ist die automatisierte Regelung des Produktionsprozesses auf Basis dieser neuen Informationen bezüglich der Lage der Anhaulante und Bauteilgeometrie. Dafür müssen praxistaugliche Konzepte entwickelt werden. Ein solcher Ansatz ist die Verknüpfung von Werkzeug und Presse. So könnten Maschineneinstellungen, etwa die lokalen Blechhalterkräfte, automatisiert auf Basis der Information der Anhaulante verstellt werden. Höherfeste Materialien werden in den nächsten Jahren zunehmend an Bedeutung, speziell in der Kaltumformung, gewinnen. Problematisch ist die Beherrschung ihrer vergleichsweise hohen Rückfederung und Streuung in der klassischen Presswerksproduktion. Eine Kombination der Inline-Geometriemessung mit regelbaren Nachschlagewerkzeugen könnte einen wesentlichen Beitrag zur Beherrschung dieser Materialien für Strukturbauteile leisten.

Kritisch zu hinterfragen ist die Vorgehensweise zur Auswahl geeigneter Messpunkte für die Inlinemessung. Es gilt der Grundsatz, möglichst wenige, aber qualitätsrelevante Punkte zu erfassen. Hier können statistische FEM-Berechnungen zukünftig an Bedeutung gewinnen. Während heute zur statistischen Absicherung von komplexen Bauteilen wie Seitenrahmen die Rechenkapazitäten noch keinen effizienten Einsatz ermöglichen, werden steigende Rechenkapazitäten bald neue Wege eröffnen. Statistische FEM-Berechnungen werden eine genaue Fehleranalyse ermöglichen und aufzeigen, welche Messpunkte diese Fehler identifizieren können. Zielführend ist in diesem Zusammenhang die Integration von Inline-Messtechnik in den Standard-Planungsprozess von Werkzeugen. So könnte der Methodenplaner bereits kritische Messpunkte aus der Simulation identifizieren und diese an den Konstrukteur übermitteln. Dessen Aufgabe ist die Einplanung von Sensoren zur Überwachung dieser Messpunkte, im einfachsten Fall die Vorhaltung des benötigten Platzes. Im Rahmen der praktischen Werkzeugfertigung sollten diese Sensoren zusammen mit den herkömmlichen Teilelagesensoren eingebracht werden, sodass ein funktionsfähiges System bereits bei der ersten Werkzeugeinarbeit Informationen aufnehmen kann.



## A Anhang

### Studentische Arbeiten

| Name           | Typ der Arbeit | Titel (Jahr)  |
|----------------|----------------|---|
| Liebig, A.     | Semesterarbeit | Entwicklung eines Prüfstandes zur Validierung von Inline-Geometriemessungen im Presswerk (2015)                 |
| Liebig, A.     | Masterarbeit   | Einsetzbarkeit von Sensorkameras zur Unterstützung des Einarbeitsprozesses im Werkzeugbau (2016)                |
| Schmerbeck, T. | Semesterarbeit | Übertragbarkeitsstudie zur optischen Überwachung des Einlaufweges im Presswerk an ausgewählten Bauteilen (2016) |
| Wierer, M.     | Semesterarbeit | Einsetzbarkeit von Sensorkameras zur optischen Einlaufwegmessung im Presswerk (2016)                            |

### Zusätzliche Abbildungen

| Nr.<br>[-] | Ziehtiefe z<br>[mm] | Blechhalterdruck     |                |                   |
|------------|---------------------|----------------------|----------------|-------------------|
|            |                     | pro Zylinder<br>[kN] | gesamt<br>[kN] | pro Seite<br>[kN] |
| 1          | 140                 | 550                  | 2200           | 1100              |
| 2          | 120                 | 550                  | 2200           | 1100              |
| 3          | 100                 | 550                  | 2200           | 1100              |
| 4          | 80                  | 550                  | 2200           | 1100              |
| 5          | 60                  | 550                  | 2200           | 1100              |
| 6          | 40                  | 550                  | 2200           | 1100              |
| 7          | 140                 | 750                  | 3000           | 1600              |
| 8          | 140                 | 850                  | 3400           | 1700              |
| 9          | 140                 | 450                  | 1800           | 900               |

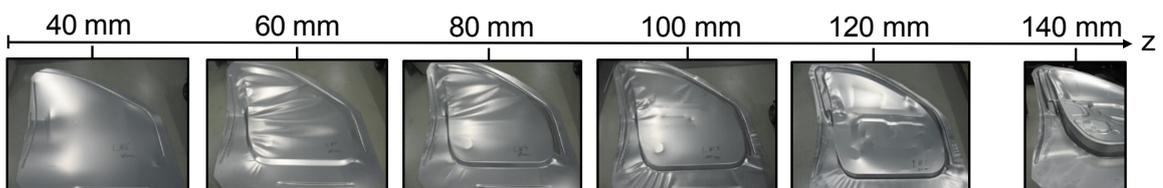
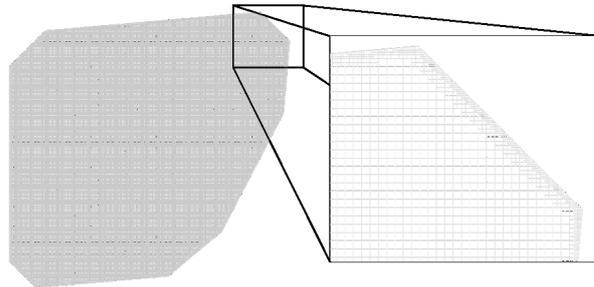


Abbildung A.1: Herstellung von Bauteilen mit unterschiedlicher Ziehtiefe an einer TryOut-Pressen mit Vier-Punkt-Ziehkissen

**Platine:**  
Mittlere Netzgröße 8 mm, Randelementgröße 2 mm



**Werkzeugkomponenten AFO15:**

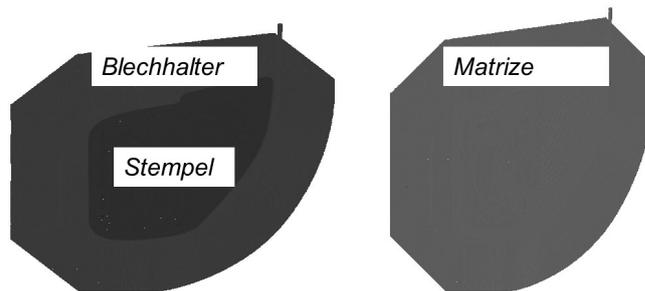


Abbildung A.2: Vernetzung von Platine und Werkzeugkomponenten aus AFO15 in PAM-STAMP

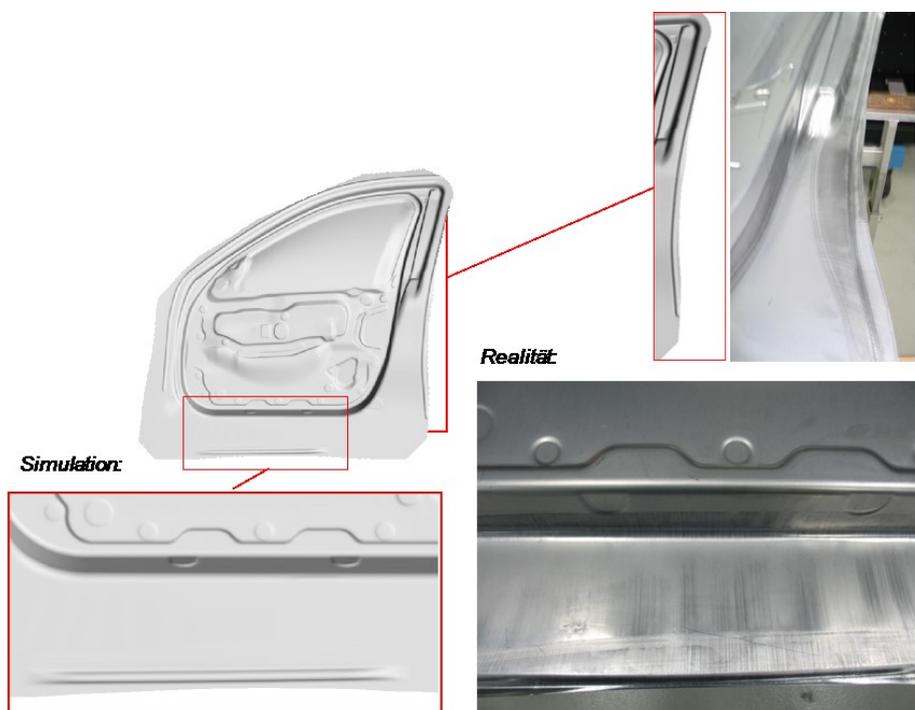


Abbildung A.3: Flanscheinzug nach AFO15 aus Simulation und Realität

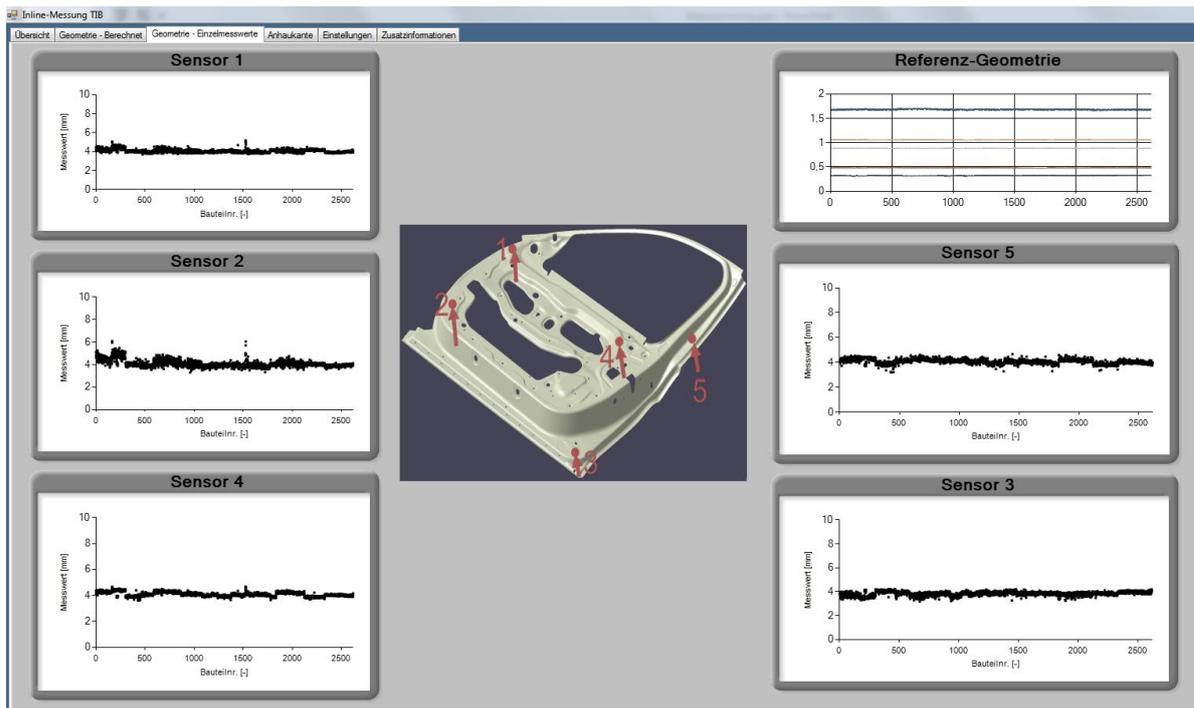


Abbildung A.4: Darstellung der Einzelmessergebnisse der Abstandssensoren in der Visualisierung

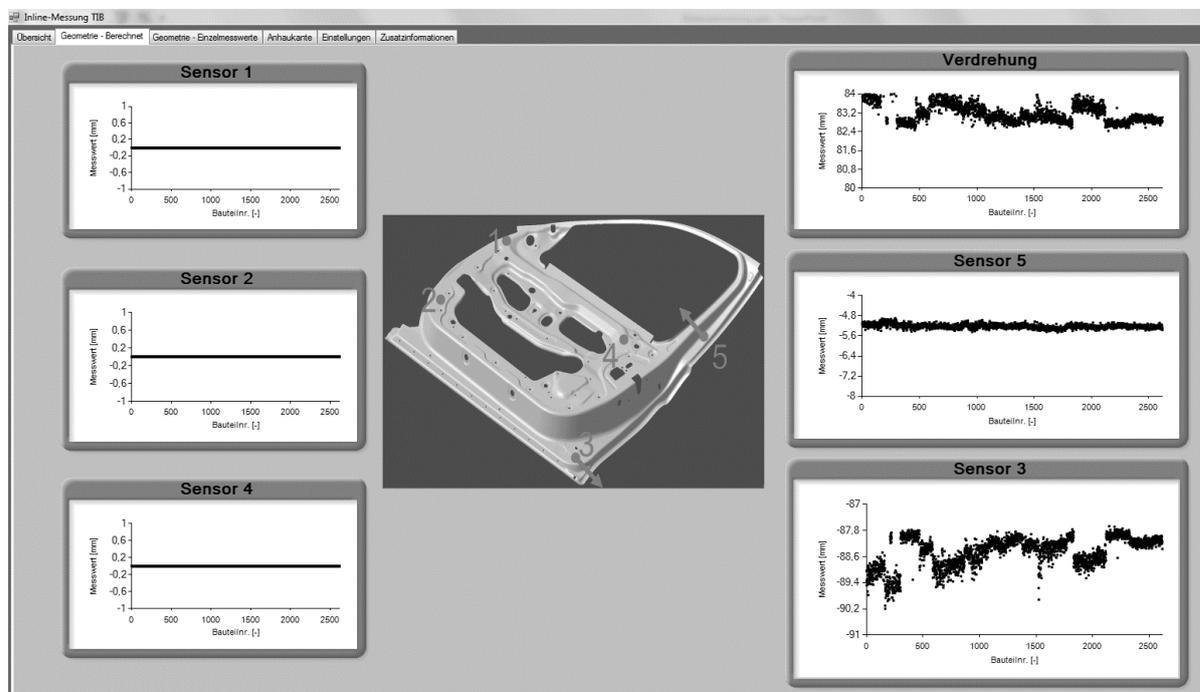


Abbildung A.5: Darstellung der Ergebnisse der Koordinatentransformation der Geometriemessung in der Visualisierung

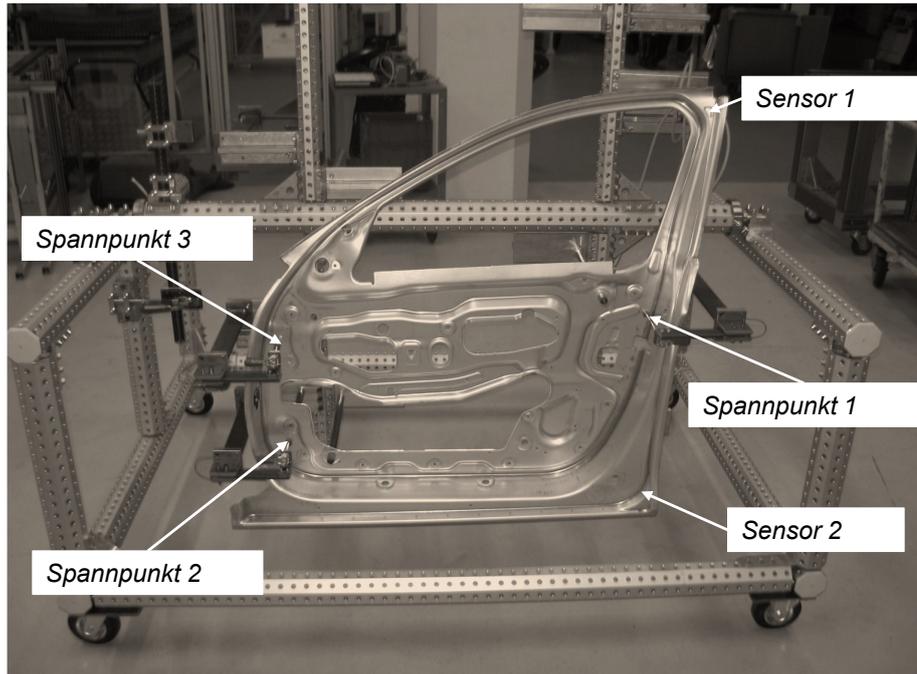


Abbildung A.6: Prüfstand zur Bewertung der Einflüsse der Inline-Geometriemessung

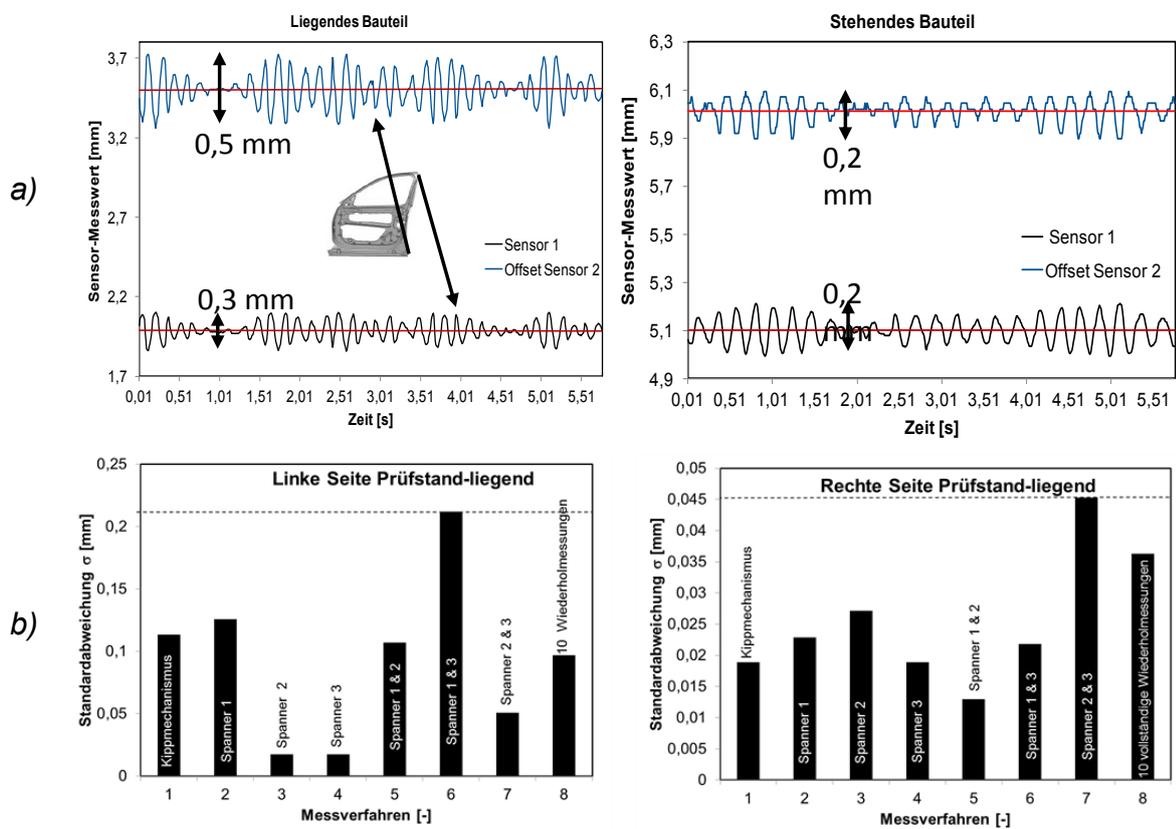


Abbildung A.7: Mittelung der Abstandsmesswerte zur Kompensation von Bauteilschwingungen (a) und Bewertung der Wiederholgenauigkeit (b) des Prüfstandes

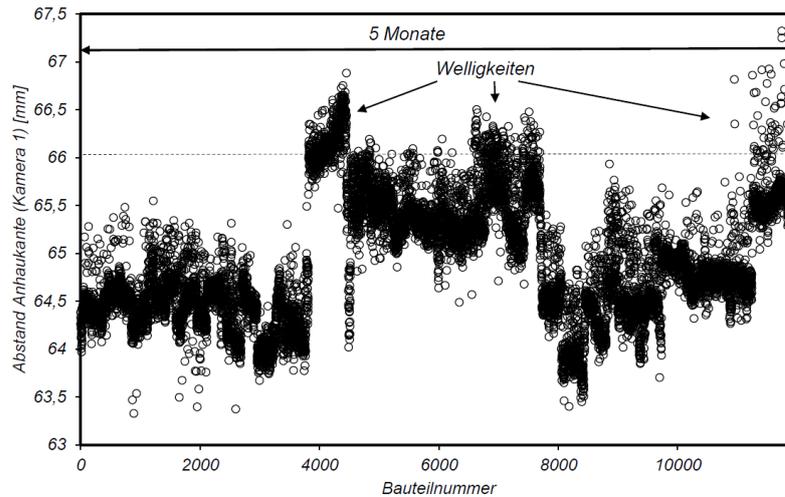


Abbildung A.8: Langzeitbetrachtung der Messergebnisse am Übergang zur C-Säule des Seitenrahmens

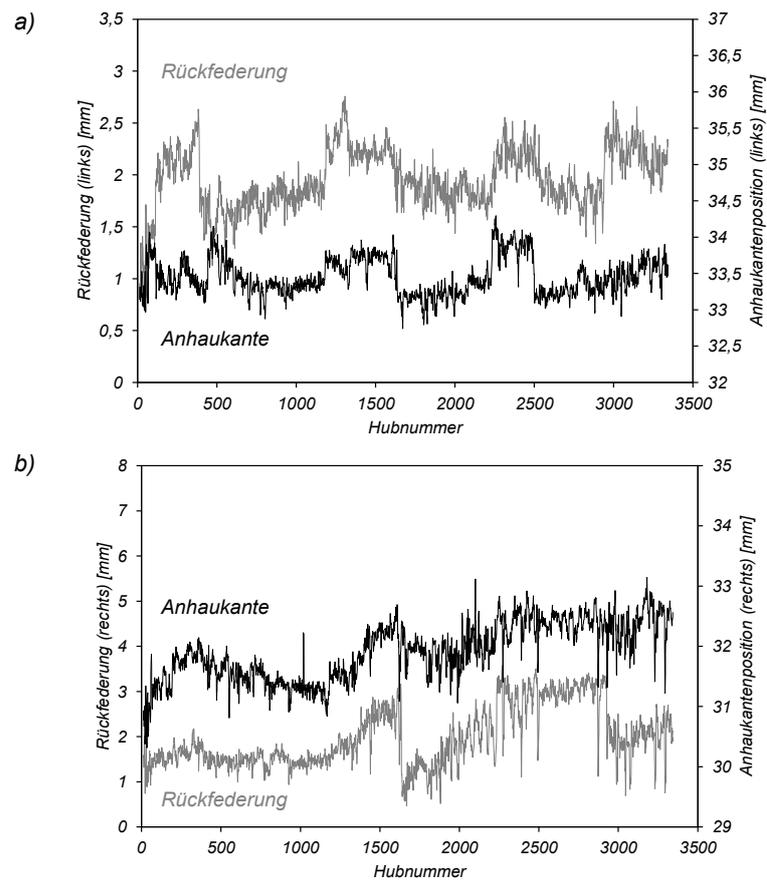


Abbildung A.9: Gleitende Durchschnitte aus drei Messwerten für Rückfederung bzw. Bauteilverdrehung und Anhaukantenposition der linken (a) und rechten (b) Bauteilseite

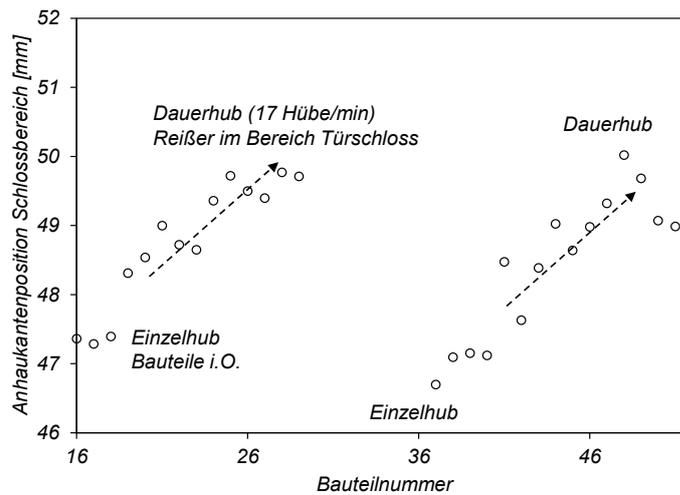


Abbildung A.10: Einfluss des Dauerhub-Betriebes (17 Hübe/min) auf die resultierende Bauteilqualität im Bereich des Türschlosses

### Zusätzliche Tabellen

Tabelle A.1: Übersicht der eingesetzten Komponenten zur Anhaukanten-Detektion

| Name           | Detaillierte Bezeichnung              |
|----------------|---------------------------------------|
| Kamera         | IS7200 without PatMax, C-Mount        |
| Objektiv       | LENS/12MM, FIXED FOCAL F/8-FOV        |
| Beleuchtung    | SVL 75MM SMPL BRICK SPOT - 625        |
| Lichtkabel     | IN-SIGHT LIGHT CABLE W/FERRITE - 0.5M |
| Ethernet-Kabel | Cognex Std. Ethernet Cable            |
| Stromkabel     | POWER and I/O M12-12 - 5M CABLE       |

## B Abbildungsverzeichnis

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| Abbildung 2.1:  | Einteilung des Karosserieherstellungsprozesses in planende und tatsächliche Herstellungsprozesse nach Birkert et al. (2013) .....       | 3  |
| Abbildung 2.2:  | Wesentliche Komponenten eines Presswerks, geordnet nach dem Materialfluss vom Coil zum fertigen Bauteil, angelehnt an Schuler (1996) .. | 4  |
| Abbildung 2.3:  | Tiefziehen eines Napfes mit den Werkzeugkomponenten Blechhalter, Ziehmatrize und Stempel nach Doege und Behrens (2010) .....            | 6  |
| Abbildung 2.4:  | Formänderungsdiagramm einer Seitenwand mit Kennlinien des idealen Tief- und Streckziehens (Birkert et al., 2013) .....                  | 7  |
| Abbildung 2.5:  | Aufbau eines einfachwirkenden Ziehwerkzeuges (Schuler, 1996) .....  | 8  |
| Abbildung 2.6:  | Schematischer Ablauf des einfachwirkenden Ziehvorganges nach Doege und Behrens (2010) .....   | 9  |
| Abbildung 2.7:  | Aufbau eines Nachfolgewerkzeuges mit Beschnitt- und Lochoperationen (Schuler, 1996) .....   | 10 |
| Abbildung 2.8:  | Einflussgrößen auf den Umformprozess (Faaß, 2009) .....   | 12 |
| Abbildung 2.9:  | Matrizen-Anhaukante am Ziehteil eines Türinnenbleches .....   | 17 |
| Abbildung 2.10: | Schematischer Regelkreis zur Regelung des Einlaufweges beim Umformen .....  | 24 |
| Abbildung 2.11: | Verknüpfung von Input- und Outputgrößen zur Analyse ihrer Abhängigkeiten (Data-Mining) .....  | 26 |
| Abbildung 2.12: | Schritte der Bildaufnahme bis zur digitalen Bildinformation nach Burger und Burge (2015) .....  | 28 |
| Abbildung 2.13: | Funktionsweise der subpixelgenauen Kantendetektion .....  | 29 |
| Abbildung 3.1:  | Vorgehensweise für die Erarbeitung neuer, werkzeugintegrierter Messkonzepte im Presswerk .....  | 33 |
| Abbildung 4.1:  | Ausschussquoten infolge von Reißern für verschiedene Bauteile aus dem Presswerk Dingolfing der BMW Group aus dem Jahr 2014 .....        | 35 |
| Abbildung 4.2:  | Übersicht der fünf Arbeitsfolgen (AFO) zur Herstellung des Versuchsbauteils sowie deren Werkzeuge und Bearbeitungsumfänge .....         | 37 |

---

|                 |   |    |
|-----------------|---|----|
| Abbildung 4.3:  | Messaufnahme eines Türinnenbleches, die Positionierung des Bauteils erfolgt über drei Auflageflächen (y-Richtung) mittels Spannern sowie einem Vollbolzen (x- und z-Richtung)- und Schwertbolzen (z-Richtung) | 38 |
| Abbildung 4.4:  | Optische Messung des Versuchsbauteils Türinnenblech mittels Streifenlichtprojektion nach dem Spannkonzep der 3-Punkt-Auflage (links) und 4-Punkt-Auflage  | 39 |
| Abbildung 4.5:  | Auswertung der Messpunkte R1552 und R1553 (Abweichungen in y-Richtung) für 100 Serienmessungen des Versuchsbauteils   | 40 |
| Abbildung 4.6:  | Auswertung der Bauteilverdrehung für 100 Serienmessungen des Versuchsbauteils   | 41 |
| Abbildung 4.7:  | Bewertung der Wiederholgenauigkeit der Serienmessungen mittels fünf Wiederholmessungen am gleichen Bauteil  | 42 |
| Abbildung 4.8:  | Prüfanweisung des Versuchsbauteils Türinnenblech mit Kennzeichnung der verschiedenen Bauteilbereiche  | 43 |
| Abbildung 4.9:  | Falten 1. und 2. Art am untersuchten Türinnenblech  | 43 |
| Abbildung 4.10: | Streckgrenze und Zugfestigkeit aus 78 serienbegleitenden Zugversuchen infolge von Materialreklamationen des Presswerks  | 45 |
| Abbildung 4.11: | Gleichmaß- und Bruchdehnung aus 78 serienbegleitenden Zugversuchen  | 45 |
| Abbildung 4.12: | Fließkurve und Einzel-Zugversuchsergebnis von AlMg5,7/AlMg1   | 46 |
| Abbildung 4.13: | Aufbau der Ziehstufen AFO15 und AFO20, bestehend aus den Werkzeugen Blechhalter, Stempel und Matrize sowie Niederhalter und Einweiser   | 48 |
| Abbildung 4.14: | Konstruierte Schablonen zur Aufnahme von Mikrokameras für die Anhaukantendetektion in drei Bauteilbereichen sowie Auswertungssoftware zur Bildverarbeitung  | 49 |
| Abbildung 4.15: | Auswertung der absoluten Anhaukantenposition im Schwellerbereich für Bauteile aus zwei Kaltbändern  | 50 |
| Abbildung 4.16: | Vorgehensweise zum Vergleich der Simulation mit dem Realprozess   | 51 |
| Abbildung 4.17: | Vergleich der Anhaukanten aus Simulation und Realität im Schwellerbereich für verschiedene Parameter aus AFO15 und AFO20  | 52 |
| Abbildung 4.18: | Qualitativer Vergleich der Anhaukanten aus Simulation und Realität  | 53 |

---

|  |    |
|--|----|
| Abbildung 4.19: Einlaufweg der validierten Referenzsimulation, ausgewertet hinsichtlich absoluter, lokaler Verschiebungen im Flanschbereich des Bauteils...            | 54 |
| Abbildung 4.20: Änderung des Einlaufweges am Bauteil infolge geänderter Eingangsgrößen (Blechhalterkraft, Fließkurve, Reibung) bezogen auf die Referenzsimulation..... | 55 |
| Abbildung 5.1: Exemplarisch eingelegtes Bauteil im Nachfolgewerkzeug AFO35.....  | 57 |
| Abbildung 5.2: Verschiedene Zeitpunkte eines Werkzeughubes.....  | 58 |
| Abbildung 5.3: Beispielhafte, bauteilspezifische Koordinatensysteme (KOS) für Türinnenblech und Dachaußenhaut.....   | 59 |
| Abbildung 5.4: Optische Vermessung des realen Aufsatzes mit Versuchsbauteil zur Abschätzung des erforderlichen Sensor-Messbereichs .....                               | 61 |
| Abbildung 5.5: Geometrie, technische Daten sowie Messgenauigkeit für AIMg5,7/AIMg1 des Wirbelstromsensors Eddy-NC DT 3010 U6 .....                                     | 62 |
| Abbildung 5.6: Positionen der fünf Wirbelstromsensoren am Werkzeugaufsatz sowie Benennung spezifischer Komponenten .....   | 63 |
| Abbildung 5.7: Messaufbau zur Erfassung der fünf Sensorsignale am Werkzeugunterteil  | 64 |
| Abbildung 5.8: Definition des Werkzeugkoordinatensystems und der Sensor-Positionsvektoren am Werkzeugaufsatz .....   | 65 |
| Abbildung 5.9: Definition des Werkzeugkoordinatensystems, der Sensor-Ergebnisvektoren und der absoluten Bauteilverdrehung .....  | 67 |
| Abbildung 5.10: Einfluss der Einzel-Messwerte auf die berechnete Bauteilverdrehung ....  | 69 |
| Abbildung 5.11: Verwendung der Anhaukante als durchgängige Messgröße von der Planung zum Serienprozess .....   | 70 |
| Abbildung 5.12: Vorversuche im Labor und am Werkzeug.....  | 71 |
| Abbildung 5.13: Aufbau des Kamerasystems zur Überwachung des Schlossbereichs am Werkzeug .....   | 72 |
| Abbildung 5.14: Ablauf eines Werkzeughubes und Bildaufnahme nach Öffnen des Werkzeuges .....   | 73 |
| Abbildung 5.15: Auswertung der Anhaukantenpositionen in den Bauteilbereichen Scharnier und Schloss mittels Bildverarbeitung .....                                      | 74 |

|   |    |
|---|----|
| Abbildung 5.16: Mittels Visual Basic programmierte Visualisierungsoberfläche zur Darstellung der Messergebnisse für jeden Pressenhub während der Produktion .....   | 76 |
| Abbildung 6.1: Vorgehensweise zur Validierung des Pilotsystems im Serieneinsatz .....   | 77 |
| Abbildung 6.2: Messung des Abstandes zum Bauteil am Sensor <i>R2</i> und Trigger-Signal während eines beispielhaften Werkzeughubes.....                             | 79 |
| Abbildung 6.3: Gegenüberstellung der gemessenen Abstände bei offenem (IV) und geschlossenem Werkzeug (III) an Position <i>R3</i> für 3600 produzierte Bauteile..... | 80 |
| Abbildung 6.4: Mittlerer Fehler der fünf Referenzabstände für 3600 Bauteile, gemessen während einer regulären Serienabpressung .....                                | 81 |
| Abbildung 6.5: Vergleich der mittleren Referenzabstände nach einem Einsatzzeitraum von sechs Monaten .....  | 82 |
| Abbildung 6.6: Wiederholgenauigkeit der Geometriemessung bei zehnmaligen, manuellen Einlegen eines Türinnenbleches .....  | 83 |
| Abbildung 6.7: Darstellung der Einzel-Abstandswerte für eine Abpressung von 3600 Bauteilen.....   | 85 |
| Abbildung 6.8: Berechnete Abweichungen in <i>z</i> für die Abpressung von 3600 Bauteilen .  | 86 |
| Abbildung 6.9: Zusammenhang zwischen eingestellter Blechhalterkraft und Bauteilverdrehung nach Maier, Liebig et al. (2017) .....                                    | 87 |
| Abbildung 6.10: Vergleich der Maßabweichung von G1 und R1552 für 16 Bauteile .....  | 89 |
| Abbildung 6.11: Geometrie-Prüfstand zur Untersuchung der Einflussgrößen zwischen Inline- und Offlinemessung .....   | 89 |
| Abbildung 6.12: Untersuchung des Einflusses der Bauteillage auf die Bauteilverdrehung mittels Prüfstand und statischen FEM-Berechnungen .....                       | 90 |
| Abbildung 6.13: Absolute Position <i>Y</i> der starren Werkzeugkante im Scharnierbereich nach Maier, Wierer et al. (2016) .....                                     | 92 |
| Abbildung 6.14: Aufgezeichnete Prozessschwankungen der Anhaulante mit konstanter Blechhalterkraft für 3600 Bauteile .....   | 93 |
| Abbildung 6.15: Beispielhafte Auswertung zweier Schloss-Bilder mit Anhaulantenabständen von 8 und 15 mm .....   | 93 |

---

|   |     |
|---|-----|
| Abbildung 6.16: Vergleich mit manuellen Messungen der Schloss-Anhaukante.....   | 95  |
| Abbildung 6.17: Vergleich mit manuellen Messungen der Scharnier-Anhaukante .....  | 95  |
| Abbildung 6.18: Vergleich der mittels Mikrometerschraube gemessenen Blechdicken mit den Positionen der Anhaukante für 16 Bauteile.....  | 96  |
| Abbildung 6.19: Vergleich der gleitenden Mittelwerte der Anhaukantenposition im Schlossbereich und Bauteilverdrehung von 3600 produzierten Bauteilen .....  | 98  |
| Abbildung 6.20: Falschfarben-Diagramm der Bauteilverdrehung .....   | 99  |
| Abbildung 7.1: Exemplarische Prozesskorrektur nach Überschreiten der Eingriffsgrenze der Anhaukante im Schlossbereich während einer Serienabpressung..  | 102 |
| Abbildung 7.2: Prozessverläufe für Bauteilverdrehung und Scharnier-Anhaukante für die betrachtete Abpressung.....   | 103 |
| Abbildung 7.3: Linker Seitenrahmen mit qualitätskritischen Bereichen und Fehlerbildern  | 104 |
| Abbildung 7.4: Aufbau des Kamerasystems zur Überwachung der Anhaukanten an den Übergängen von Einstieg zu B- und C-Säule .....  | 105 |
| Abbildung 7.5: Angepasste Visualisierungsoberfläche zur Darstellung der Messergebnisse beider Kameras an der Presse, die Grenzwertüberschreitungen im Messverlauf von Kamera 2 können Bauteile mit Reißertyp 1 zugeordnet werden..... | 106 |
| Abbildung 7.6: Identifikation von Welligkeiten am Seitenrahmen auf Basis der Inline-Messdaten .....   | 107 |
| Abbildung 7.7: Sensoren zur Geometrie- und Einlaufwegmessung am Nachfolgewerkzeug des Türinnenbleches (5er 2016).....   | 108 |
| Abbildung 7.8: Gemessene Bauteilverdrehungen an linken und rechten Türinnenblechen einer Abpressung .....   | 109 |
| Abbildung 7.9: Informationsfluss von der Simulation bis zur Produktion .....  | 110 |
| Abbildung 7.10: Integration der Sensorkameras auf dem Blechhalter eines Ziehwerkzeuges.....   | 111 |
| Abbildung 7.11: Abgleich zwischen der Postionen der Anhaukante im Schlossbereich des Türinnenbleches aus Simulation und Einarbeitsbauteil .....   | 112 |

---

|  |     |
|--|-----|
| Abbildung 7.12: Auswertung der Anhaulantenposition im Schlossbereich eines Türinnenbleches über mehrere Einarbeitstermine an Produktions- und Versuchspresse .....                     | 113 |
| Abbildung 7.13: Verlauf der Anhaulantenposition für die zweite Einarbeit an der Produktionspresse .....  | 114 |
| Abbildung 7.14: Einplanung von werkzeugintegrierter Inline-Messtechnik im Werkzeugenstehungsprozess .....  | 116 |
| Abbildung 7.15: Gegenüberstellung der laufenden Kosten für die Nachkontrolle eines Bauteils mit einer Losgröße von 5000 Stück pro Woche und einem Inline-System mit vier Kameras ..... | 117 |
| Abbildung A.1: Herstellung von Bauteilen mit unterschiedlicher Ziehtiefe an einer TryOut-Presse mit Vier-Punkt-Ziehkissen .....  | 123 |
| Abbildung A.2: Vernetzung von Platine und Werkzeugkomponenten aus AFO15 in PAM-STAMP .....   | 124 |
| Abbildung A.3: Flanscheinzug nach AFO15 aus Simulation und Realität .....  | 124 |
| Abbildung A.4: Darstellung der Einzelmessergebnisse der Abstandssensoren in der Visualisierung .....   | 125 |
| Abbildung A.5: Darstellung der Ergebnisse der Koordinatentransformation der Geometriemessung in der Visualisierung .....   | 125 |
| Abbildung A.6: Prüfstand zur Bewertung der Einflüsse der Inline-Geometriemessung ....  | 126 |
| Abbildung A.7: Mittelung der Abstandsmesswerte zur Kompensation von Bauteilschwingungen (a) und Bewertung der Wiederholgenauigkeit (b) des Prüfstandes                                 | 126 |
| Abbildung A.8: Langzeitbetrachtung der Messergebnisse am Übergang zur C-Säule des Seitenrahmens .....  | 127 |
| Abbildung A.9: Gleitende Durchschnitte aus drei Messwerten für Rückfederung bzw. Bauteilverdrehung und Anhaulantenposition der linken (a) und rechten (b) Bauteilseite .....           | 127 |
| Abbildung A.10: Einfluss des Dauerhub-Betriebes (17 Hübe/min) auf die resultierende Bauteilqualität im Bereich des Türschlosses .....  | 128 |

---

## C Tabellenverzeichnis

|              |   |     |
|--------------|---|-----|
| Tabelle 4.1: | Anforderungen an die chemische Zusammensetzung des Kernmaterials<br>der Legierung AlMg5,7/AlMg1 ..... | 44  |
| Tabelle 4.2: | Technische Lieferbedingungen der Versuchslegierung AlMg5,7/AlMg1 .                                    | 44  |
| Tabelle 7.1: | Wirkung der Inline-Messtechnik in Abhängigkeit ihres Einbettungsgra-<br>des in der Produktion .....   | 101 |
| Tabelle A.1: | Übersicht der eingesetzten Komponenten zur Anhauskanten-Detektion ...                                 | 128 |



## D Literaturverzeichnis

- ABDULLAH, A., S.M. SAPUAN, Z. SAMAD, N. AZIZ (2012). A comprehensive review of experimental approaches used in the measurement of springback. In: *Advances in Natural and Applied Sciences* **6**, 195–206.
- ADAM, W., M. BUSCH, B. NICKOLAY (1997). *Sensoren für die Produktionstechnik*. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.
- ANNEN, C. (2012). *Entwicklung einer neuen Methode zur Ermittlung und Visualisierung von robusten Prozessfenstern in der Blechumformung*. Dissertation. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich.
- BARTHAU, M., M. LIEWALD (2016). New Approach for Closed Loop Control of Deep Drawing Process for a Control Intervention during Deep Drawing Stroke. In: *Advanced Materials Research* **1140**.
- BECK, S. (2001). Aktive Ziehsicken: Den Ziehprozess mit aktiven Ziehsicken steuern. In: *wt Werkstatttechnik online* **10**, 602–607.
- BETH, M. (1993). *Untersuchungen zum Rückfederungsverhalten von Feiblechen bei Tief- und Streckziehvorgängen*. Dissertation. Darmstadt: Technische Hochschule Darmstadt.
- BIRKERT, A., S. HAAGE, M. STRAUB (2013). *Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile: Auslegung von Ziehanlagen*. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.
- BLAICH, C. (2012). *Robuster Tiefziehprozess durch Erfassung und Optimierung der örtlichen Bauteilqualität*. Stuttgart: DGM Informationsgesellschaft Verlag.
- BOHN, M. (1998). *Toleranzmanagement im Entwicklungsprozeß: Reduzierung der Auswirkungen von Toleranzen auf Zusammenbauten der Automobil-Karosserien*. Dissertation. Karlsruhe: Universität Karlsruhe.
- BRÄUNLICH, H. (2002). *Blecheinzugsregelung beim Tiefziehen mit Niederhalter - ein Beitrag zur Erhöhung der Prozeßstabilität*. Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten.
- BURGER, W., M. BURGE (2015). *Digitale Bildverarbeitung: Eine algorithmische Einführung mit Java*. 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- DANZBERG, J. (2001). *Einsatz hierarchischer parametrisierter Konstruktionsmethodik zur Planung und Optimierung von Karosserieblechteilen*. Dissertation. Zürich: ETH Zürich.
- DEMANT, C., B. STREICHER-ABEL, A. SPRINGHOFF (2011). *Industrielle Bildverarbeitung: Wie optische Qualitätskontrolle wirklich funktioniert*. 3. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- DIN 5459 (1982). *Technische Zeichnungen, Form- und Lagetolerierung, Bezüge und Bezugssysteme für geometrische Toleranzen*.
- DIN 6892 (2009). *Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur*.
- DIN 8580 (2003). *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*.
- DIN 8582 (2003). *Fertigungsverfahren Umformen - Einordnung; Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht*.
- DOEGE, E., B. BEHRENS (2010). *Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen*. 2. Auflage. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.

- DOEGE, E., H.-J. SEIDEL, B. GRIESBACH, J.-W. YUN (2002). Contactless on-line measurement of material flow for closed loop control of deep drawing. In: *J. Mater. Process. Technol.* **130-131**, 95–99.
- EICHHORN, A. (2005). *Optische 3D-Formerfassung für die integrierte Qualitätsprüfung von Karosserieaufteilen*. München: Hieronymus Verlag.
- ENDRES, M. (2012). *Entwicklung einer aktiven Steuerung für die geometrischen Qualitätsziele der Prozesskette Karosseriebau in der Vorserie*. Dissertation. Chemnitz: Technische Universität Chemnitz.
- FAASS, I. (2009). *Prozessregelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken*. München: Hieronymus Verlag.
- FLEISCHER, J., G. LANZA, V. SCHULZE (2014). Berichte aus dem Maschinenbau: Life-Cycle-Performance von Produktionssystemen. In: *Tagungsband zur wbk-Herbsttagung*.
- FORSTMANN, U. (2000). *Induktive Wegsensoren zur Überwachung und Regelung des Blecheinzugs beim Tiefziehen*. Dissertation. Berlin: Technische Universität Berlin.
- GORJI, M. (2015). *Instability and Fracture Models to Optimize the Metal Forming and Bending Crack Behavior of Al-Alloy Composites*. Dissertation. Zürich: ETH Zurich.
- GRIESBACH, B. (2000). *In-Prozeß Stoffflussmessung zur Analyse und Führung von Tiefziehvorgängen*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.
- GROCHE, P., P. BEITER, M. HENKELMANN (2008). Prediction and inline compensation of springback in roll forming of high and ultra-high strength steels. In: *Prod. Eng. Res. Devel.* **2**, 401–407.
- GROCHE, P., J. SCHREINER, J. HOHMANN, M. BIRKHOFF, A. LECHLER (2014). Industrie 4.0 - Chancen auch für die Umformtechnik. In: *VDI-Z* **156**, 28–31.
- GRÜBELER, R. (2002). *Simulation des umformtechnischen Tribosystems*. Dissertation. Zürich: Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- GUNNARSSON, Lars, Erik SCHEDIN (2001). Improving the properties of exterior body panels in automobiles using variable blank holder force. In: *Journal of Materials Processing Technology* **114**, 168–173.
- HAHN, M. (2004). *Beurteilung der Ausprägung von Anbau- und Nachlaufkanten mit Hilfe der FEM*. München: Hieronymus Verlag.
- HAMEDON, Z., K. MORI, Y. ABE (2014). In-situ measurement of three-dimensional deformation behaviour of sheet and tools during stamping using borescope. In: *J. Mater. Process. Technol.* **214**, 945–950.
- HARTUNG, C. (2001). *Beurteilung des optischen Erscheinungsbildes von Ziehteilen mit Hilfe numerischer Verfahren*. München: Hieronymus Verlag.
- HAUPT, H. (2003). *Ein auf die Schallemissionsanalyse basierendes Verfahren zur Risserkennung in Umformprozessen*. Dissertation. Paderborn: Universität Paderborn.
- HEINGÄRTNER, J., A. NEUMANN, D. HORTIG, Y. RENCKI, P. HORA, JW YOON, TB STOUGHTON, B. ROLFE, JH B., P. HODGSON (2013). Acquisition of material properties in production for sheet metal forming processes. In: *AIP Conference Proceedings*. **1567**. 1. AIP, 671–674.

- HELD, C, M LIEWALD, M SINDEL (2009). Untersuchungen zum Einfluss werkstofflicher Schwankungen innerhalb eines Coils auf die Umformbarkeit. In: *wt Werkstatttechnik online* **10**, 732–739.
- HORA, P., B. BERISHA, M. GORJI, H. HIPPE (2016). Forming behaviour above the classical FLC-Limits - Experimental methods and numerical models for the prediction of sheet crack phenomena. In: *Forming Technology Forum*, 31–38.
- HORTIG, D. (2014). Integration der Qualitätsprozesse zur Steigerung der Prozessrobustheit, Produktivität und Flexibilität. In: *Münchener Kolloquium: Produktionskongress*.
- KAUPPER, M., M. MERKLEIN (2013). Bendability of advanced high strength steels—A new evaluation procedure. In: *CIRP Annals-Manufacturing Technology* **62.1**, 247–250.
- KEFERSTEIN, C., M. MARXER (2015). *Fertigungsmesstechnik: Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren*. 8. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien.
- KEYENCE CORPORATION (2017). *Mikrokamera CV-035M: Hardware und Software (besucht am 10.06.2017)*. URL: <http://www.keyence.de/products/vision/vision-sys/cv-x100/models/cv-035m/index.jsp>.
- KITAYAMA, S., S. HAMANO, K. YAMAZAKI, T. KUBO, H. NISHIKAWA, H. KINOSHITA (2010). A closed-loop type algorithm for determination of variable blank holder force trajectory and its application to square cup deep drawing. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* **51.5-8**, 507–517.
- KÖTH, C. (2009). Keine Kompromisse mehr: Der neue 7er BMW hat eine Aluminium-Türinnenstruktur, die auf der Novelis Fusion Technik basiert. In: *Automobil-Industrie* **5**, 52.
- KRENGEL-ROTHENSEE, K., F. HILBK-KORTENBRUCK, M. KRAUHAUSEN (2006). Hochpräzise Laser-Messtechnik zur 100 Prozent Inline-Geometrieprüfung in der Industrie. In: *VDI-Berichte* **1945**, 59–74.
- KRINNINGER, M., D. OPRITESCU, R. GOLLE, W. VOLK (2016). Experimental Investigation of the Influence of Punch Velocity on the Springback Behavior and the Flat Length in Free Bending. In: *Procedia CIRP* **41**, 1066–1071.
- LANGE, K. (1990). *Umformtechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Band 3: Blechbearbeitung*. 2. Auflage. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.
- LEUSCHEL, R. (2010). *Toleranzmanagement in der Produktentwicklung am Beispiel der Karosserie im Automobilbau*. Dissertation. Freiberg: Technischen Universität Bergakademie Freiberg.
- LI, R., M.L. BOHN, K.J. WEINMANN, A. CHANDRA (2000). A study of the optimization of Sheet metal drawing with active drawbeads. In: *Journal of Manufacturing Processes* **2.4**, 205–216.
- MAIER, S., A. LIEBIG, T. KAUTZ, W. VOLK (2017). Tool-integrated spring back measuring system for automotive press shops. In: *Prod. Eng. Res. Devel.* **11**, 307–313.
- MAIER, S., M. WIERER, T. KAUTZ, W. VOLK (2016). Optische Einlaufwegmessung in Nachfolgewerkzeugen: Digital Shadow in automobilen Presswerken. In: *wt Werkstatttechnik online* **10**, 695–698.
- MEILER, M. (2005). *Großserientauglichkeit trockenschmierstoff-beschichteter Aluminiumbleche im Presswerk*. Bamberg: Meisenbach Verlag.

- MEINHARDT, J., W. VOLK, H. SCHMIDT (2002). Virtuelle Prozessentwicklung von Presswerkzeugen im industriellen Umfeld. In: *Umformtechnik–Erschließung wirtschaftlicher und technologischer Potenziale* **17**, 271–284.
- MOHR, K.P., R. BODE, W. DECHÊNE (2000). Unerfüllbare Wünsche – Gleichmäßige Ölverteilung in kaltgewalzten Coils derzeit nicht erfüllbar. In: *Bänder, Bleche, Rohre* **41**, 81–84.
- MORK, R. (2011). *Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze*. München: Herbert Utz Verlag.
- MUNDE, A. (2015). Exakte Messmethoden als Grundlage für Industrie 4.0. In: *Maschinenmarkt* **48**, 42–43.
- MUNSER, R., A. JACUBASCH, U. WAGNER (2004). Messen beim Pressen. In: *wt Werkstatttechnik online* **10**, 544–545.
- NEUMANN, A. (2013). *Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk*. Bamberg: Meisenbach Verlag.
- NEUMANN, A., D. HORTIG, M. MERKLEIN (2011). Measurement of material flow in series production. In: *Key Eng. Mater.* **473**, 137–144.
- OSTERMANN, F. (2015). *Anwendungstechnologie Aluminium*. Springer-Verlag.
- PETSCH, N. (2006). *Beölung von Feinblech in Band und Tafel*. Stahl-Informations-Zentrum, Merkblatt 127.
- PREXL, A. (2013). *Entwicklung einer Methodik zur simulationsgestützten Inbetriebnahme von Karosseriewerkzeugen*. München: Hieronymus Verlag.
- PURR, S., J. MEINHARDT, A. LIPP, A. WERNER, M. OSTERMAIR, B. GLÜCK (2015). Stamping Plant 4.0: Basics for the Application of Data Mining Methods in Manufacturing Car Body Parts. In: *Key Engineering Materials* **639**, 21–30.
- RELARD, H. (2015). „A method for monitoring a production line and production line for the production of automobile parts“. Patent DE102011001852 (DE).
- RITTMEIER, S. (2007). *Systemunterstützte Umformung*. Göttingen: Cuvillier Verlag.
- RUZOVIC, M. (2000). *Diagnose und Korrektur von Umformprozessen im Rahmen der In-Prozess-Qualitätssicherung*. Düsseldorf: VDI Verlag GmbH.
- SCHMITT, R. (2006). Optische Messtechnik für die Automobilindustrie - Anwendungen und Trends. In: *Seminar Optische Mess- und Prüftechnik für die Automobilindustrie, RWTH Aachen*.
- SCHMITT, R., B. DAMM (2008). Prüfen und Messen im Takt. Wie Sie mit Inline-Messtechnik Ihre Wertschöpfung maximieren. In: *QZ - Qualität und Zuverlässigkeit* **53**, 57–59.
- SCHULER (1996). *Handbuch der Umformtechnik*. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.
- SIEGERT, K. (2015). *Blechumformung: Verfahren, Werkzeuge und Maschinen*. Berlin-Heidelberg: Springer Verlag.
- SIEGERT, K., M. KLAMSER, O. STRAUBE (1990). Fehlererkennung beim Tiefziehen. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* **8**, 416–420.
- STÖHR, H., A. TRIDL (2014). „Production line for producing molded sheet metal parts, having at least one measuring device for inspecting the produced molded parts“. Patent WO2014/173658 (WO).

STRAUBE, O. (1993). Körperschallanalysen an Tiefziehwerkzeugen. In: *ZWF CIM* 88 **10**, 457–459.

— (1994). *Untersuchungen zum Aufbau einer Prozessregelung für das Ziehen von Karosserieteilen*. Berlin: Technische Universität Berlin.

THAMM, U. (1998). *Bewertung von Tiefziehprozessen durch Infrarot-Thermografie*. Dissertation. Chemnitz: Technische Universität Chemnitz.

WEBER, J. (2014). Intelligente Knotenpunkte in der Smart Factory. Inline-Messtechnik unterstützt die Produktion im Industrie 4.0 Zeitalter. In: *Quality Engineering* **3**, 80–81.

WEIKMANN, J. (2010). *Assistenzsystem für die Prüfung von Blechbauteilen mit Mehrkomponenten-Streifenprojektionssystemen unter Anwendung der "virtuellen Rückdeformation"*. Dissertation. Erlangen-Nürnberg: Friedrich-Alexander-Universität.

YOO, H., Z. LIU, NN QUANG, S. KIM, F. BIEN (2016). Implementation of Nondestructive Crack Detection System for Automotive Press Panel. In: *IEEE Sensors Journal* **16.2**, 383–389.

ZIEGLER, M.C. (1999). *Schwingende Niederhalterkräfte und Regelkreise beim Tiefziehen axialsymmetrischer Blechformteile*. Stuttgart: DGM Informationsgesellschaft Verlag.

# Dissertationen des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen, Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

- 01 *Felix Zimmermann*  
Generierung von maßgeschneiderten Bauteileigenschaften in  
PHS-Bauteilen durch Anlassen mittels Flamme; 2014;  
Urn: <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20141201-1229030-0-7>
- 02 *Christopher Joseph Thoma*  
Simulationsgestützte Optimierung der Maßhaltigkeit in der  
Prozesskette Druckguss; 2015; ISBN: 978-3-73699-009-8
- 03 *Joung Sik Suh*  
Verbesserung der Kaltumformbarkeit von AZ31 Mg-Blech  
durch Equal Channel Angular Pressing (ECAP); 2015;  
Urn: <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20151215-1271570-1-8>
- 04 *Robert Ramakrishnan*  
3-D-Drucken mit einem anorganischen Formstoffsystem; 2016;  
Urn: <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20160129-1276474-1-5>
- 05 *Patrick Saal*  
Quantitative Phasenanalyse von ausferritischem Gusseisen  
mithilfe der Neutronendiffraktometrie; 2017;  
Urn: <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20170125-1304161-1-8>
- 06 *Peter Sachnik*  
Methodik für gratfreie Schnittflächen beim Scherschneiden; 2017;  
Urn: <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20160406-1304184-1-8>
- 07 *Thomas Martin Kopp*  
Einfluss der Werkzeugsteifigkeit auf Scherschneidprozess  
und Werkzeugverschleiß beim offenen Schnitt; 2017;  
Urn: <http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn:nbn:de:bvb:91-diss-20170426-1327352-1-7>
- 08 *Simon Josef Maier*  
Inline-Qualitätsprüfung im Presswerk durch intelligente  
Nachfolgewerkzeuge; 2018; ISBN: 978-3-95884-004-1