

# **Verfahren zur hämmernden Blechumformung mit Industrieroboter**

Von der Fakultät für Maschinenbau der Universität Stuttgart zur Erlangung  
der Würde eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Timo Schäfer

aus Kirchheim/Teck

**Hauptberichter:** Prof. Dr.-Ing. Prof. E.h. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. mult. E. Westkämper

**Mitberichter:** Prof. Dr.-Ing. M. Liewald MBA

**Tag der Einreichung:** 24. Mai 2006

**Tag der mündlichen Prüfung:** 14. Februar 2007

Institut für Industrielle Fertigung und Fabrikbetrieb der Universität Stuttgart

2007

# Inhaltsverzeichnis

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Abkürzungen und Formelzeichen</b>   | <b>13</b> |
| <b>1 Einleitung</b>  | <b>19</b> |
| 1.1 Problemstellung  | 19        |
| 1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise   | 21        |
| <b>2 Ausgangssituation</b>   | <b>22</b> |
| 2.1 Begriffe und Definitionen  | 22        |
| 2.2 Herstellungskette der Blechumformung und Einteilung gängiger Blechumformverfahren  | 23        |
| 2.3 Stand der Technik bei der Umformung von Blechteilen kleiner Losgröße   | 24        |
| 2.3.1 Flexibilisierung des Tief- und Streckziehens   | 24        |
| 2.3.2 Inkrementelle Blechumformverfahren mit thermischer Einwirkung  | 26        |
| 2.3.3 Inkrementelle Blechumformverfahren mit mechanischer Einwirkung   | 26        |
| 2.3.4 Anlagen zur inkrementellen Blechumformung  | 29        |
| 2.4 Folgerungen aus dem Stand der Technik  | 31        |
| <b>3 Analyse potentieller Anwendungsszenarien sowie Ableitung von Anforderungen an ein roboterbasiertes System zur hämmernden Blechumformung</b> | <b>32</b> |
| 3.1 Analyse der Produktionssituation von Blechteilen   | 32        |
| 3.2 Analyse des Produktspektrums   | 34        |
| 3.2.1 Zielbranchen und typische Hauptfunktionen von Blechteilen  | 34        |
| 3.2.2 Analyse des Anlieferungszustands von Blechen   | 34        |
| 3.2.3 Mechanische Eigenschaften von Blechwerkstoffen   | 35        |
| 3.2.4 Klassifizierung von Blechteilen in Abhängigkeit von der Geometrie  | 36        |
| 3.3 Analyse potenzieller Anwendungsszenarien   | 37        |
| 3.3.1 Szenarien zur Verfahrenskombination  | 37        |
| 3.3.2 Anwendungsszenario „Funktionsbauteil“  | 39        |
| 3.3.3 Anwendungsszenario „Behälter“  | 40        |
| 3.3.4 Anwendungsszenario „Verkleidung und Abdeckung“   | 40        |

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 3.4      | Analyse alternativer Werkzeugprinzipien zur hämmernden Blechumformung mit Industrieroboter   | 41        |
| 3.5      | Analyse der Einflussfaktoren bei Gestaltung und Einsatz von Gesamtsystemen zur hämmernden Blechumformung mit Industrieroboter  | 43        |
| 3.6      | Erwartete Hemmnisse beim industriellen Einsatz der hämmernden Blechumformung mit Industrieroboter  | 44        |
| 3.7      | Folgerungen aus den Analyseergebnissen und Ableitung von Untersuchungsschwerpunkten  | 45        |
| 3.8      | Ableitung von Anforderungen an ein System zur hämmernden Blechumformung mit Industrieroboter   | 46        |
| 3.8.1    | Definition von Teilfunktionen und Zuordnung zu Teilsystemen  | 46        |
| 3.8.2    | Anforderungen an das Gesamtsystem und die Teilsysteme  | 47        |
| <b>4</b> | <b>Konzept für Gesamtsystem und Verfahrensablauf zur hämmernden Blechumformung mit Industrieroboter sowie Konzeption von Teilsystemen und alternativen Gesamtsystemen zur Verfahrenskombination</b>                      | <b>49</b> |
| 4.1      | Konzept für Gesamtsystem und Verfahrensablauf  | 49        |
| 4.2      | Konzeption des Fixiersystems   | 50        |
| 4.3      | Konzeption des Blechhaltesystems   | 52        |
| 4.4      | Konzeption des Hammerwerkzeugs   | 55        |
| 4.5      | Konzeption alternativer Gesamtsysteme zur Verfahrenskombination  | 57        |
| <b>5</b> | <b>Theoretische und experimentelle Untersuchung wichtiger Einfluss- und Ergebnisgrößen bei der hämmernden Blechumformung mit Industrieroboter und Ableitung von Umformstrategien zur Erweiterung des Einsatzbereichs</b> | <b>62</b> |
| 5.1      | Wichtige Einfluss-, Prozess- und Ergebnisgrößen bei der hämmernden Blechumformung  | 62        |
| 5.2      | Aufbau einer Versuchsanlage zur hämmernden Blechumformung mit Industrieroboter   | 63        |
| 5.3      | Theoretische und experimentelle Untersuchung der Oberflächengüte in Abhängigkeit verschiedener Einflussgrößen  | 66        |
| 5.4      | Theoretische und experimentelle Untersuchung der resultierenden Blechdicke in Abhängigkeit von der Flankenneigung  | 72        |
| 5.5      | Experimentelle Bestimmung der maximal zulässigen Flankenneigung in Abhängigkeit vom Werkstoff und der Ausgangsblechdicke   | 75        |
| 5.6      | Experimentelle Untersuchung der Maßhaltigkeit  | 76        |
| 5.7      | Experimentelle Untersuchung der Kaltverfestigung durch Ermittlung von Spannungs-Dehnungs-Diagrammen und Härtemessungen   | 78        |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| 5.8      | Zusammenfassung der Erkenntnisse und Folgerungen   | 81         |
| 5.9      | Ableitung von Umformstrategien zur Erweiterung des Einsatzbereichs der hämmernden Blechumformung   | 83         |
| 5.9.1    | Mathematische Beschreibung der in einer Umformstufe herstellbaren Sollformen   | 83         |
| 5.9.2    | Zweistufige Umformstrategien zur Herstellung komplexerer Sollformen  | 84         |
| 5.9.3    | Mehrstufige Umformstrategien zur Erhöhung der Maßhaltigkeit  | 86         |
| <b>6</b> | <b>Theoretische Untersuchung des Schwingungsverhaltens bei der hämmernden Blechumformung mit Industrieroboter zur Auslegung der Anlagentechnik</b> | <b>89</b>  |
| 6.1      | Phasenmodell der hämmernden Blechumformung mit Industrieroboter  | 89         |
| 6.2      | Entwicklung eines mechanischen Ersatzmodells der hämmernden Blechumformung mit Industrieroboter  | 90         |
| 6.3      | Mathematische Beschreibung des mechanischen Ersatzmodells  | 91         |
| 6.3.1    | Analytische Lösung für eine nicht oszillierende Stempelbewegung  | 93         |
| 6.3.2    | Analytische Näherungslösung der ungedämpften Bewegungsgleichung  | 93         |
| 6.3.3    | Analytische Näherungslösung der ungedämpften Bewegungsgleichung für sehr hohe Schlagfrequenzen   | 97         |
| 6.3.4    | Numerische Lösung der gedämpften Bewegungsgleichung auf Basis eines Simulationsmodells   | 99         |
| 6.4      | Verifikation des mechanischen Ersatzmodells  | 100        |
| 6.4.1    | Entwicklung einer Methode zur Bestimmung der Parameter des mechanischen Ersatzmodells  | 100        |
| 6.4.2    | Ermittlung der Parameter des mechanischen Ersatzmodells  | 103        |
| 6.4.3    | Verifikation im Versuch  | 104        |
| 6.5      | Theoretische Schwingungsuntersuchung zur Abschätzung des Einflusses unterschiedlicher Einflussgrößen   | 107        |
| 6.5.1    | Schwingungsuntersuchung mittels analytischer Näherungslösung der ungedämpften Bewegungsgleichung   | 107        |
| 6.5.2    | Schwingungsuntersuchung mittels numerischer Lösung der gedämpften Bewegungsgleichung   | 111        |
| 6.6      | Folgerungen  | 113        |
| <b>7</b> | <b>Realisierung und Erprobung einer prototypischen Pilotanlage für die hämmernde Blechumformung mit Industrieroboter</b>                           | <b>115</b> |
| 7.1      | Gesamtaufbau der Pilotanlage   | 115        |
| 7.2      | Eingesetzte Teilsysteme und Komponenten der Pilotanlage  | 115        |
| 7.2.1    | Industrieroboter   | 115        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 7.2.2     | Hammerwerkzeug  | 116        |
| 7.2.3     | Kombiniertes Fixier- und Blechhaltessystem  | 118        |
| 7.2.4     | Bahngenerierungssoftware  | 118        |
| 7.3       | Arbeitsablauf der Pilotanlage   | 120        |
| 7.4       | Erprobung des Verfahrens  | 122        |
| 7.4.1     | Herstellung von Demonstrationsblechteilen in einer Umformstufe und Untersuchung der Maßhaltigkeit   | 122        |
| 7.4.2     | Herstellung von Demonstrationsblechteilen unter Anwendung der abgeleiteten Umformstrategien für komplexere Sollformgeometrien                       | 123        |
| 7.4.3     | Herstellung eines Prototypenblechteils für die Automobilindustrie unter Anwendung einer abgeleiteten Umformstrategie zur Erhöhung der Maßhaltigkeit | 124        |
| 7.4.4     | Prozesszeiten bei der hämmernden Blechumformung   | 125        |
| 7.4.5     | Fehlerarten und -häufigkeiten   | 126        |
| 7.5       | Folgerungen   | 127        |
| <b>8</b>  | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>   | <b>130</b> |
| <b>9</b>  | <b>Summary</b>  | <b>133</b> |
| <b>10</b> | <b>Literaturverzeichnis</b>   | <b>138</b> |
| 10.1      | Bücher, Zeitschriften, Konferenzen und Tagungen   | 138        |
| 10.2      | Normen und Richtlinien  | 152        |
| 10.3      | Schutzrechte  | 152        |
| 10.4      | Verbände, Firmen und Produkte   | 153        |

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung

Der internationale Konkurrenzdruck in Produktionsunternehmen ist heute durch eine zunehmende Innovationsdynamik gekennzeichnet. Die abnehmende Vermarktungsdauer der Produkte, die in einzelnen Fällen schon kürzer als die Entwicklungszeit ist, erfordert eine wachsende Anzahl von Neuentwicklungen und eine Beschleunigung der Prototypenentwicklungszyklen, um am Markt besser bestehen zu können. Damit gewinnen ein früher Markteintritt und ein auf Kundenwunsch genau abgestimmtes Produkt an Bedeutung [SFB 2006].

Speziell für die heutige Umformtechnik stellen die immer kürzer werdenden Produktlebenszeiten bei gleichzeitig gestiegenen Anforderungen an Funktionalität, Umweltverträglichkeit und Qualität eine große Herausforderung dar [Groche 2000]. Der Trend zu immer komplexeren Blechteilgeometrien und deutlich abnehmenden Losgrößen widerspricht jedoch den meist relativ starren Produktionsabläufen, wie z.B. in der Automobilindustrie, für die es über lange Jahre ein priorisiertes Ziel war, hohe Losgrößen produktionsicher und wirtschaftlich zu fertigen [Westkämper 2003].

Den Einsatzmöglichkeiten gängiger Blechumformverfahren wie dem Tiefziehen oder dem Streckziehen [DIN 8582] sind aufgrund hoher Investitionskosten und fehlender Flexibilität somit immer häufiger klare Grenzen gesetzt [Westkämper 2003]. Zwar gibt es Bestrebungen durch die Anwendung von formvariablen Formwerkzeugen die Flexibilität der Verfahren zu erhöhen, jedoch wird eine formungebundene Gestalterzeugung dadurch nicht erreicht [Hennige 2001]. Auch die beträchtlichen Investitionskosten für die Werkzeugmaschinen, die aufgrund hoher auftretender Umformkräfte sehr robust aufgebaut sind, lassen sich dadurch nicht reduzieren. Die mehrmalige Verwendung formvariabler Formwerkzeuge ermöglicht lediglich eine Verringerung des Anteils der Werkzeugkosten an den Gesamtkosten.

Die geschilderten Grenzen der Flexibilisierung gängiger Blechumformverfahren führten deshalb in den letzten Jahren zur Entwicklung neuer Umformverfahren, bei denen das Blech die gewünschte Endkontur durch eine große Zahl kleiner Umformschritte unter Anwendung einfacher, universell einsetzbarer Werkzeuge erhält [DFG 2004]. Da die Blechumformung dabei schrittweise erfolgt, werden diese Verfahren als „inkrementelle

Umformverfahren“ bezeichnet. Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass keine oder nur eine geringe Werkzeugbindung besteht und dass die benötigten Umformkräfte sehr viel geringer sind als bei den gängigen Verfahren.

Inkrementelle Blechumformverfahren sind somit für eine flexible Fertigung von Blechteilen kleiner Losgröße prädestiniert, jedoch konnten sich die Verfahren bislang kaum in der Industrie etablieren. Ein Grund hierfür ist, dass für die inkrementellen Blechumformverfahren teilweise Sondermaschinen eingesetzt werden müssen, die aufgrund ihrer Investitionskosten eine wirtschaftliche Produktion von Blechteilen in geringen Stückzahlen nicht immer gestatten. Zudem wird für die Herstellung komplexerer Geometrien bei den meisten inkrementellen Blechumformverfahren zumindest eine Formwerkzeughälfte benötigt, so dass nach wie vor erhebliche Zeit- und Kostenfaktoren für die Formherstellung anfallen.

Aufgrund des Trends zu immer leistungsfähigeren, kostengünstigeren und flexibleren Handhabungseinrichtungen [IFR 2004] bietet sich der Einsatz von sechsachsigen Industrierobotern für die inkrementellen Blechumformverfahren besonders an. Allerdings können Industrieroboter aufgrund ihrer im Vergleich zu Werkzeugmaschinen geringen Steifigkeit nur geringen Reaktionskräften ausgesetzt werden. So wird selbst ein sehr leistungsfähiger Industrieroboter mit 175 kg Handhabungsgewicht bei gängigen inkrementellen Blechumformverfahren bereits bei der Umformung dünner Stahlbleche überlastet [Lamminen 2005]. Um die Verwendung eines Industrieroboters zur inkrementellen Blechumformung dickerer Bleche zu gestatten, ist somit ein Verfahrensprinzip anzuwenden, welches hohe Umformkräfte bei gleichzeitig geringen Reaktionskräften auf den Industrieroboter erlaubt.

Ein vielversprechender Ansatz, diese Forderung zu erfüllen, ist die Automatisierung der manuellen hämmernden Blechumformung, da hierbei durch die abrupte Verzögerung des Hammers beim Auftreffen auf dem Werkstück hohe Umformkräfte bei gleichzeitig geringen Reaktionskräften auf die Hand des Menschen erzeugt werden können. Bisher existieren jedoch keine grundlegenden Erkenntnisse über die Möglichkeit, Blechteile durch eine hämmernde Umformung mit Hilfe eines Industrieroboters herzustellen.

## **8 Zusammenfassung und Ausblick**

Die industrielle Herstellung von Blechteilen erfolgt in der Serienfertigung zumeist durch Tiefziehen mit formgebundenen Werkzeugen. Aufgrund der kostenintensiven Werkzeugmaschinen und Werkzeuge ist dieses Umformverfahren für die Herstellung von Blechteilen in kleinen Stückzahlen nur begrenzt geeignet, weshalb in den letzten Jahren zahlreiche neue, so genannte inkrementelle Blechumformverfahren für die Prototypen- und Kleinserienfertigung von Blechteilen entwickelt wurden. Diese Verfahren sind dadurch gekennzeichnet, dass die Geometrie des Blechteils durch eine große Zahl kleiner Umformschritte unter Anwendung einfacher, universell nutzbarer Werkzeuge schrittweise erzeugt wird, wodurch sich die Zeit und die Kosten zur Werkzeugherstellung reduzieren lassen. Zudem sind Anlagen zur inkrementellen Blechumformung aufgrund der lokal wirkenden Werkzeuge und der dadurch reduzierten Umformkräfte häufig kostengünstiger als Anlagen zum Tiefziehen.

Um von dem Trend zu immer kostengünstigeren und leistungsfähigeren Industrierobotern profitieren und damit die Anlagenkosten weiter senken zu können, wurde in der vorliegenden Forschungsarbeit der Ansatz verfolgt, ein roboterbasiertes Umformverfahren zu entwickeln, welches in Anlehnung an das manuelle Treiben durch ein hämmerndes Umformprinzip die Reaktionskräfte auf den Industrieroboter reduziert. Über eine hämmernde Blechumformung mit Industrierobotern existierten bislang keine grundlegenden Erkenntnisse.

Das Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit war es daher, ein Verfahren zur hämmernden Blechumformung unter Verwendung eines Industrieroboters zu entwickeln, durch eine systematische Vorgehensweise grundlegende Erkenntnisse über den Umformprozess sowie die technische Umsetzbarkeit des neuen Umformverfahrens nachzuweisen und hierfür alle technischen Voraussetzungen wie die Anlagentechnik sowie die Software zur Generierung des Umformpfades zur Verfügung zu stellen.

Ausgehend von der Darstellung des Standes der Technik der flexiblen Blechumformung sowie der Analyse der Produktionssituation und des Produktspektrums wurden potenzielle Anwendungsszenarien des Verfahrens und insbesondere Szenarien zur Verfahrenskombination vorgestellt. Auf Basis der Analyse der Anwendungsszenarien, der Analyse der Einflussfaktoren bei der Gestaltung und dem Einsatz von Gesamtsystemen zur hämmernden Blechumformung mit Industrierobotern sowie der von Experten erwarteten

Hemmnisse beim industriellen Einsatz des Verfahrens wurden Teilsysteme zur hämmern- den Blechumformung definiert sowie Anforderungen an das Gesamtsystem und die Teil- systeme abgeleitet. Um den von den Experten erwarteten prozess- und anlagenspezifi- schen Haupthemmnissen entgegenwirken zu können, wurden zwei Untersuchung- schwerepunkte festgelegt. So wurden zum einen theoretische und experimentelle Unter- suchungen wichtiger Einfluss- und Ergebnisgrößen bei der hämmernden Blechumfor- mung mit Industrieroboter durchgeführt und Umformstrategien zur Erweiterung des Einsatzbereichs des Verfahrens abgeleitet. Zum anderen wurde zur Auslegung der Anla- gentechnik das Schwingungsverhaltens bei der hämmernden Blechumformung mit In- dustrieroboter theoretisch untersucht. Für das Hammerwerkzeug wurde zunächst ein Exzenterantrieb ausgewählt, da dieser, wie Vorversuche mit Hammerwerkzeugen mit unterschiedlichen Werkzeugprinzipien gezeigt haben, für das Verfahren Vorteile bietet.

Im Anschluss an die Analyse wurde das Konzept für das Gesamtsystem und den Verfah- rensablauf vorgestellt. Entsprechend der in der Analyse definierten Teil- und Gesamtsys- teme sowie den Szenarien zur Verfahrenskombination wurden Konzepte für das Fixier- system, das Blechhaltesystem und das Hammerwerkzeug sowie für Gesamtsysteme mit der Möglichkeit zur Verfahrenskombination entwickelt. Für das Fixier- und Blechhaltesys- tem wurden Lösungsvarianten mit geringem technischen Aufwand zur Realisierung ei- ner ersten Versuchsanlage ausgewählt. Für das Hammerwerkzeug wurde zunächst eine Lösungsvariante favorisiert, welche theoretisch die Kompensation aller Trägheitskräfte im Werkzeug gestattet und damit die Schwingungserregung des Industrieroboters bei der hämmernden Blechumformung auf ein Minimum reduziert.

Nach der Realisierung einer ersten Versuchsanlage zur hämmernden Blechumformung gemäß den ausgewählten Lösungsvarianten für die Teilsysteme wurden entsprechend den abgeleiteten Untersuchungsschwerpunkten Grundlagenversuche bezüglich der Oberflächengüte, der resultierenden Blechdicke, der maximalen Flankenneigung, der Maßhaltigkeit und der Kaltverfestigung hämmernd umgeformter Blechteile durchge- führt. Das Ergebnis der Untersuchungen waren qualitative und quantitative Aussagen, welchen Einfluss bestimmte Parameter auf diverse Ergebnisgrößen besitzen und welche Verfahrensgrenzen bestehen. Darauf basierend wurden zur Erweiterung des Einsatzbe- reichs der hämmernden Blechumformung Umformstrategien für Blechteile mit komple- xerer Geometrie sowie Umformstrategien zur Erhöhung der Maßhaltigkeit abgeleitet.

Zur Umsetzung des zweiten Untersuchungsschwerpunkts wurde ein mechanisches Ersatzmodell der hämmernden Blechumformung aufgestellt, die Parameter des Ersatzmodells experimentell ermittelt und das Modell anhand von Grundlagenversuchen verifiziert. Die auf Basis des Modells durchgeführten theoretischen Schwingungsuntersuchungen erlaubten qualitative und quantitative Aussagen zur Auslegung des Hammerwerkzeugs und des Industrieroboters.

Um die hämmernde Blechumformung in einem Gesamtsystem zu erproben, wurde eine prototypische Pilotanlage bestehend aus den Teilsystemen Industrieroboter, Hammerwerkzeug, kombiniertes Fixier- und Blechhaltesystem, und Bahngenerierungssoftware realisiert. Die Erprobung erfolgte anhand einiger Demonstrationsblechteile sowie eines Prototypenblechteils für die Automobilindustrie. Mit der Pilotanlage konnte einerseits die technische Umsetzbarkeit der hämmernden Blechumformung mit Industrieroboter und andererseits die zur Erweiterung des Einsatzbereichs des Verfahrens abgeleiteten Umformstrategien nachgewiesen werden.

Nach einer Weiterentwicklung und Optimierung der Teilsysteme kann die hämmernde Blechumformung industriell eingesetzt werden. Insbesondere sind folgende Maßnahmen durchzuführen:

- Das Hammerwerkzeug sollte für eine Erhöhung der Standzeit optimiert werden, indem sämtliche Lager, Gelenke und Antriebselemente verstärkt und ihre Schmierung verbessert werden, eine Flüssigkeitskühlung realisiert wird sowie alle Verbindungselemente gegen Loslösen gesichert werden.
- Das Fixier- und Blechhaltesystem ist für den industriellen Einsatz auszulegen bzw. zu automatisieren und im Falle einer gewünschten Nachbearbeitung bzw. Individualisierung bereits umgeformter Blechteile für diese Geometrien anzupassen.
- Die Bahngenerierungssoftware sollte um prozess- und roboterspezifische Funktionen ergänzt werden.

Durch die Verfahrenskombination mit anderen Umform- und Schneidverfahren kann das neu entwickelte Verfahren für eine effiziente Herstellung von Blechteilen kleiner Losgröße und hoher Variantenvielfalt eingesetzt werden. Der Industrieroboter kann hierbei neben der Führung diverser Werkzeuge auch zur Handhabung der Blechtafel, der umgeformten Blechteile und der Schablonen des Fixiersystems verwendet werden.

## 9 Summary

### Sheet metal forming by hammering using an industrial robot

#### Chapter 1: Introduction and objectives

Today the pressure of international competition causes a decreasing product life time requiring shorter product development cycles. This situation offers a big challenge for manufacturing enterprises, especially in the field of sheet metal forming. Conventional sheet metal forming processes, e.g. deep drawing and stretch forming, are linked to high costs for equipment and forming tools and are therefore not suitable for producing sheet metal parts in small lot sizes.

In order to reduce the costs for equipment and forming tools, several efforts have been undertaken during the last years. On the one hand, the flexibility of conventional forming processes has been increased, and on the other hand, new, so called incremental sheet metal forming processes have been developed. The latter in particular are well suited for prototype and small batch production of sheet metal parts. With these incremental forming processes, the geometry of a sheet metal part is generated by a sequence of small forming steps using simple, all-purpose tools to reduce time and money for the production of forming tools. In addition, the equipment for incremental sheet metal forming processes is often more cost-efficient than the equipment for conventional processes, as the tool forms the sheet metal locally causing lower reaction forces.

Unfortunately, up to this day, these processes could not be established in industry as the costs for the forming equipment are still too high. Hence, this dissertation tackles the issue to use an industrial robot for incremental forming, as robots have become more and more inexpensive, powerful and flexible. However, former scientific studies have shown that industrial robots are not well suited for existing sheet metal forming processes because of their low stiffness in comparison to machine tools. Therefore, a hammering forming principle based on manual hammering is used to reduce the reaction forces on the robot.

As there are no scientific insights concerning sheet metal forming by hammering using an industrial robot, the main objective of this research work is to develop such a process and to gain a scientific basis for this forming method. By providing all technical components such as equipment and software, its technical practicability is proven.

## **Chapter 2: State of the art in industry and research**

Chapter 2 systematically describes the state of the art of conventional and incremental sheet metal forming processes. A confirmation for the demand of the hammering forming process is derived. Important terms and definitions are specified using published literature. The description of the production chain of sheet metal forming and the classification of established sheet metal forming processes introduce important aspects of this research work. By comparing available processes and equipment, an existing incremental forming principle is selected in order to combine it with the hammering forming process. Current simulation results of existing incremental sheet metal forming processes show that a simulation takes more time than an experimental examination. Since the simulation of the hammering forming process would be even more time consuming because of the oscillation of the punching tool, an analysis is preferred to a simulation.

## **Chapter 3: Analysis of possible application scenarios and derivation of a robot based system for sheet metal forming by hammering**

In chapter 3 today's sheet metal production is analyzed based on published literature. The importance of the sheet metal forming industry for both the international and the German economies is estimated and the economic capability of the incremental sheet metal forming process for production of sheet metal parts in small lots is pointed out. By analyzing the product spectrum, the industrial sectors and main applications of sheet metal parts are identified. Then, typical scenarios for the application of the hammering forming process are analyzed with respect to industrial sector, sheet metal thickness, material, part geometry and lot size. The opportunities to combine the hammering forming process with other forming, cutting and joining methods are shown and also assigned to the analyzed sheet metal parts. Thus, the possibility of realizing the complete process chain in practice is shown.

Furthermore, sub-systems and sub-functions of the hammering sheet metal forming are defined based on the analysis of different scenarios and the analysis of influencing factors concerning the design and the application of systems for incremental sheet metal forming. In addition, the challenges expected by different experts concerning the industrial use of the process are considered. Requirements for the system and its sub-systems are derived regarding the production situation and spectrum analyzed. In addition, important conclusions for process development are drawn. In order to react to the main

challenges, which are expected by experts concerning process and equipment, the research work focuses on two main points. Firstly, important influencing parameters and output quantities concerning the sheet metal forming by hammering using an industrial robot are theoretically and experimentally investigated. Based on this, forming strategies for increasing the application area are derived. Secondly, the vibration behavior during the hammering forming process using an industrial robot is theoretically examined to dimension the equipment.

The selection of the hammering tool for the incremental forming process is also a main topic in this research work. In order to be able to choose a suitable hammering tool, several preliminary tests with different tool principles were carried out. Since the hammering tool with an eccentric drive has led to the best results during preliminary tests, this tool principle is selected for further examinations in this research work.

#### **Chapter 4: Concepts of alternative systems and sub-systems**

In chapter 4, the concept of the system and the process cycle are presented. In addition, several alternatives of sub-systems and systems, which combine the hammering forming process with other forming, cutting and joining methods, are shown. As above-mentioned, the concept of the system is derived from the state of the art by combining the hammering forming process with an existing incremental forming principle. According to the defined sub-systems, explained in chapter 3, concepts for the sub-systems for fixing and supporting the sheet metal and the hammering tool are presented. Thereby, a great variety of possible solutions is shown, all of which are evaluated and selected using the requirements defined in chapter 3. As a result of this evaluation, the variants with low technical complexity are selected for the fixing and supporting system in order to realize a first test facility. A possible alternative for the hammering tool is chosen, which, theoretically, allows the compensation of all forces of mass inertia in the tool. Using this tool, the vibrations of the industrial robot during the hammering forming process can be reduced to a minimum. The concepts for alternative systems, combining the hammering forming with other processes, show how systems can be equipped with existing machines and components as well as with newly designed sub-systems. The comparison of these alternative systems allows their evaluation regarding practical use.

## **Chapter 5: Theoretical and experimental examination of the hammering forming process and derivation of new forming strategies**

Chapter 5 describes the realization of the first test facility for the hammering forming process according to the selected variants of the sub-systems. A first fundamental research is described in compliance with the first main point of examination defined in chapter 3. In particular, the surface quality, the final sheet metal thickness, the maximum wall slope, the geometrical accuracy, and the strain hardening of sheet metal parts that have been formed by hammering are examined. Furthermore, existing equations to calculate the surface quality of milled work pieces as well as to calculate the reduction of the sheet metal thickness during incremental sheet metal forming are applied to the forming process. These laws are validated by experiments. The results of these fundamental examinations are qualitative and quantitative statements in respect to how certain parameters influence several output quantities and how the process is limited. Thus, for the first time, an experimentally determined data pool and mathematical equations are available for the application of sheet metal forming by hammering using an industrial robot. These can be used as a basis for future experimental and simulative examinations. The acquired scientific knowledge is already applied to increase the application area of the hammering forming process by deriving new forming strategies for the product of sheet metal parts with more complex geometries and improved geometrical accuracy.

## **Chapter 6: Examination of the vibration behavior during the hammering forming process as basis for dimensioning the equipment**

In chapter 6 a one-dimensional mechanical model of the robot cell for hammering sheet metal forming is presented based on well-chosen assumptions and simplifications. Following that, the mathematical equations of motion of the mechanical model are set up. In order to solve the equations of motion, an analytical approximation is calculated and a simulation model is created. The latter can be used for solving the equations of motion numerically. In order to verify the mechanical model, first of all, the parameters of the model are determined in fundamental experiments. Thereafter, the theoretically achievable forming depths after each forming path based on the mechanical model are compared with values acquired experimentally. Thereby, it is shown that the mechanical model represents the forming process with a sufficient accuracy to allow the dimension-

ing of equipment. Moreover, the mechanical model allows to calculate the degree of deflection of the industrial robot. Thus, as an example, a software to compensate the compliancy of the industrial robot could be implemented in order to increase the geometrical accuracy of deformed sheet metal parts. After the derivation and verification of the mechanical model, the model is used for a theoretical examination of vibrations to formulate qualitative and quantitative statements concerning the dimensioning of the hammering tool and the industrial robot.

### **Chapter 7: Realization and testing of a prototypical pilot installation for the hammering forming process using an industrial robot**

In chapter 7 a prototypical pilot installation is presented, consisting of the sub-systems for fixing and supporting the sheet metal, the hammering tool and the software for path generation. The combined sub-systems for fixing and supporting the sheet metal and the hammering tool are realized in accordance with the solution variants in chapter 4. The pilot installation is used for testing the hammering sheet metal forming process and the developed components by producing several demonstration sheet metal parts and one sheet metal prototype for the automobile industry. The pilot installation shows the technical practicability of the hammering forming process using an industrial robot. Furthermore, the derived forming strategies to increase the application area of the process are proven. In the next years, the developed process is expected to be used in industry on the condition that not only the sub-systems will have been improved, but also the system specifications will have been adapted considering the respective task, as well as the affected production sequences and work organizations will have been modified.