

# **Roboterbasiertes Inkrementelles Blechumformen**

Dissertation

zur

Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur

der

Fakultät für Maschinenbau

der Ruhr-Universität Bochum

von

Jian Zhang

aus Hunan, V.R. China

Bochum 2007

Dissertation eingereicht am: 17. April 2007

Tag der mündlichen Prüfung: 16. August 2007

Erster Referent: Prof. Dr.-Ing. Horst Meier

Zweiter Referent: Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt

Schriftenreihe des Lehrstuhls für Produktionssysteme

Band 3/2007

**Jian Zhang**

**Roboterbasiertes Inkrementelles Blechumformen**

Shaker Verlag  
Aachen 2008

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Bochum, Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2008

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-7169-5

ISSN 1430-7324

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## **Vorwort**

---

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Produktionssysteme an der Ruhr-Universität Bochum und wurde von der dortigen Fakultät für Maschinenbau als Dissertation angenommen. An dieser Stelle möchte ich all denjenigen danken, die direkt oder indirekt zum Gelingen dieser Arbeit beitragen haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Horst Meier, Inhaber des Lehrstuhls für Produktionssysteme, danke ich sehr herzlich für seine wissenschaftliche Anleitung und Förderung meiner Arbeit sowie für seine wertvollen Anregungen.

Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Hirt, dem Leiter des Instituts für Bildsamen Formgebung der RWTH Aachen, für sein Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Koreferats.

Bei Herrn Prof. em. Dr.-Ing. Wolfgang Maßberg und Herrn Dr.-Ing. Dieter Kreimeier möchte ich mich an dieser Stelle für ihre vielfache Unterstützung bedanken.

Den Mitarbeitern am Lehrstuhl danke ich für die kollegiale, offene und konstruktive Atmosphäre der Zusammenarbeit. Hervorheben möchte ich hier besonders Herrn Dipl.-Ing. Patrick Knoll, der immer mir hilfreich zur Seite stand. Ganz besonders möchte ich mich an dieser Stelle bei den Kollegen aus dem Arbeitsbereich „Roboforming“ Herrn Dipl.-Ing. Oliver Dewald, Herrn Dipl.-Ing. Volker Smukala für die langjährige Zusammenarbeit bedanken. Weiterhin gilt mein größter Dank Frau Dr.-Ing. Brigitta Gänsicke, Herrn Dipl.-Ing. Jan Golz, Herrn Dipl.-Ing. Sascha Diltthey, Herrn Dipl.-Ing. Andreas Kneißler, Herrn Dipl.-Ing. Robert Hammelmann und Frau Dipl.-Ing. Ines Alich für die sehr gute Zusammenarbeit. Frau Bettina Schulz, Herrn Dipl.-Ing. Peter Grimme und Herrn Peter Podworny möchte ich auch hier besonders danken. Außer der Unterstützung bei der Tätigkeit am Lehrstuhl waren sie mir auch immer wichtige Ratgeber für mein Leben. Den Kollegen aus Pilotfabrik und E-Werkstatt möchte ich hier für die experimentelle Unterstützung danken. Auch all meinen Hiwis, Studien- und Diplomarbeitern danke ich für die Beiträge zu meiner Arbeit.

Das größte Dankeschön möchte ich meinen Großeltern und Eltern aussprechen. Die ständige Unterstützung während meines ganzen Lebens gibt mir den Mut und die Energie in einem fremden Land glücklich und erfolgreich tätig zu sein.



## Kurzfassung

---

In den letzten Jahren stieg der Bedarf neuer Blechumformverfahren für die Prototypen- und Kleinserienproduktion an. Der Grund liegt darin, dass es einen hohen Zeitbedarf, hohe Zeit- sowie Auslegungs- und Produktionskosten braucht, um komplexe Werkzeuge zu entwickeln. Mit der Entwicklung der Mikroelektronik in den achtziger Jahren wurde die NC-Steuerung für Umformprozesse wie das „Drücken“ und „Drückwalzen“ eingesetzt. Die NC-Steuerung ermöglicht komplexe Bewegungen und Bewegungsabläufe von Werkzeugen. Aus dem ursprünglichen Umformprinzip des Drückwalzens wurde im Jahre 1993 von Matsubara das „Incremental backward bulge forming“ mittels einer modifizierten Fräsmaschine abgeleitet. Durch dieses Verfahren lassen sich asymmetrische Bauteile durch komplexe kinematische Bewegungen von einfachen und werkstückgeometrieunabhängigen Werkzeugen herstellen. Die Formgebung entsteht sukzessiv in kleinen Teilen des Werkstücks. Das neue inkrementelle Blechumformverfahren stieß bei vielen Forschern auf großes Interesse und wurde daher eingehend untersucht und weiterentwickelt. Zurzeit wird das asymmetrische inkrementelle Umformverfahren den beiden Gruppen „two point incremental forming (TPIF)“ und „single point incremental forming (SPIF)“ zugeordnet. In der vorliegenden Arbeit wird ein neues roboterbasiertes inkrementelles Blechumformverfahren vorgestellt. Ziel der Arbeit ist es, die Entwicklung des neuen Blechumformverfahrens sowie die derzeitigen Möglichkeiten und Einsatzgrenzen vorzustellen.

Hierzu werden im ersten Schritt theoretische Grundlagen aufgezeigt und daraus die systematische Synthese für das roboterbasierte Blechumformverfahren abgeleitet. Unter der Betrachtung der Einflussparameter auf das Verfahren werden Werkzeuge ausgelegt und Umformstrategien für das roboterbasierte Blechumformverfahren analysiert. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der Generierung der Roboterbahndaten aus CAD-Modellen für das Blechumformverfahren.

Zur Realisierung des Blechumformens mit zwei Robotern wurde eine Softwarelösung zur Kopplung von CAD-Daten mit der Robotersteuerung entwickelt. Neben der Synchronisation beider Industrieroboter können Umformablauf und Umformkräfte sowie die anschließende Geometrievermessung durch benutzerfreundliche Interfaces ausgeführt werden.

Durch den Aufbau einer Umformzelle mit zwei Manutec-Industrierobotern wurden die Grundlagen des Verfahrens, wie Werkstofffluss und Formänderung, ermittelt und das Verfahrenspotenzial zur Herstellung komplexer Flächen verifiziert. Die häufigsten Fehlererscheinungen, während des Umformverlaufs in den Experimenten, und die Reproduzierbarkeit werden dargestellt und detailliert analysiert, um ein robustes Blechumformverfahren zu entwickeln. Die Umformkräfte und Formabweichung werden als wichtigste Kriterien für die Analyse des Blechumformverfahrens vergleichend betrachtet. Um das Prozesswissen des neuen Verfahrens aufzubauen, werden prinzipielle technologische Einflüsse, z. B. Zustellung, Geschwindigkeit, Neigungswinkel, Bewegungsstrategie usw. durch vielfältige Experimente ermittelt.

Als äußerst flexibles Blechumformverfahren ist das roboterbasierte inkrementelle Blechumformverfahren für das Rapid Prototyping oder die Kleinserienproduktion sehr geeignet.

Stichwörter: Blechumformen, Prototypen, Robotik



## **Abstract**

---

The demand of new sheet metal forming methods for prototypes and small series production increased in recent years. The reason is that the development of complex forming tools takes a long time and the design and production costs are high. With the development of micro-electronics in the eighties numerical control systems are used in forming processes like "spinning" and "shear forming". The numerical control system enables complex movements and motions of forming tools. Starting from the original forming principle of "shear forming" the "incremental backward bulge forming" was developed in 1993 by Matsubara with a modified milling machine. The asymmetrical components can be produced by complex motions of simple and dieless forming tools. The deformation occurs successively in small parts of the sheet metal. The new incremental forming technique was investigated and developed by many researchers with great interest. The asymmetric incremental forming includes two types "two point incremental forming (TPIF)" and "single point incremental forming (SPIF)". A new robot based incremental sheet metal forming will be presented in this thesis. The aim of the research is the development of an innovative sheet metal forming process and the analysis of current possibilities and application limitations.

As the first step the theoretical bases will be introduced and the systematic synthesis of the robot based incremental sheet metal forming will be derived. Under the consideration of the influence of different process parameters, the forming tools are developed and the forming strategies for the robot based sheet metal forming process are analyzed. The further research focuses on the calculation of robotic orbital data from CAD models for this sheet metal forming process.

A software solution to effect the robot motion from CAD data is developed to implement the sheet metal forming process with two robots. In addition to the synchronization of both industrial during the robot forming process the measurement of forming forces and geometrical error can be executed.

By building a forming cell with two Manutec industrial robots the fundamentals of the forming process such as material flow and deformation were investigated and the determine potential of the forming process for the manufacture of complex shapes were verified. The most common failures occurred during the forming process in the experiments and the reproducibility are presented and analyzed in order to ensure a stable forming process. The forming force and the shape error are considered as the most important criteria for the analysis of the sheet metal forming process. To gain knowledge of the new forming method, the principle technological influences, for example infeed, speed, draw angle and motion strategy are investigated by numerous experiments.

The incremental robot based sheet metal forming method is very suitable for rapid prototyping or small series production.

Keywords: forming, rapid Prototyping, sheet metal, robotics



# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>1</b>
	<b>1.1 Robotergeführte inkrementelle Blechumformung</b>	<b>1</b>
	<b>1.2 Aufbau der Arbeit</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>STAND DER TECHNIK</b>	<b>6</b>
	<b>2.1 Inkrementelle Blechumformung</b>	<b>6</b>
	2.1.1 Blechumformung mittels thermischer Einwirkung	9
	2.1.2 Blechumformung mittels mechanischer Einwirkung	12
	<b>2.2 Industrieroboter</b>	<b>26</b>
	2.2.1 Aufgabengebiete und Anwendungen	26
	2.2.2 Kooperierende Robotersteuerungen	30
<b>3</b>	<b>ZIELSETZUNG DER VORLIEGENDEN ARBEIT</b>	<b>36</b>
	<b>3.1 Lösungsansatz bei der roboterbasierten inkrementellen Blechumformung</b>	<b>36</b>
	<b>3.2 Zielsetzung und Handlungsbedarf</b>	<b>40</b>
<b>4</b>	<b>VERFAHRENSSPEZIFISCHE THEORETISCHE GRUNDLAGEN</b>	<b>43</b>
	<b>4.1 Theoretische Grundlagenbetrachtung</b>	<b>43</b>
	4.1.1 Vorgang des inkrementellen Blechumformens	43
	4.1.2 Einflussparameter auf die physikalischen Umformvorgänge	45
	4.1.3 Reibung und Schmierung	51
	<b>4.2 Werkzeuggestaltung</b>	<b>52</b>
	<b>4.3 Umformstrategien</b>	<b>53</b>
	4.3.1 Bewegungsablauf	54
	4.3.2 Prozessparameter	55
	4.3.3 Umformstufen	56
	<b>4.4 Bahngenerierung</b>	<b>57</b>
	4.4.1 Erzeugung der Geometriedaten	59
	4.4.2 Festlegung der Zustellpunkte	65
	4.4.3 Werkzeugkorrektur	68
	4.4.4 Anpassung der Geschwindigkeit	71

<b>5</b>	<b>SOFTWARELÖSUNG ZUR GENERIERUNG DER ROBOTERPROGRAMME</b>	<b>73</b>
	<b>5.1 Anforderungen</b>	<b>73</b>
	<b>5.2 Struktur der Software</b>	<b>74</b>
	<b>5.3 Roboter-Synchronisation mit der Multi-Thread-Methode</b>	<b>80</b>
	5.3.1 Roboterbasierte Gerätesysteme	81
	5.3.2 Multi-Thread-Funktion	83
	<b>5.4 Kalibrierungsfunktion</b>	<b>85</b>
	<b>5.5 Umformspezifische Softwaremodule</b>	<b>86</b>
	5.5.1 Vorbereitungsphase	86
	5.5.2 Angabephase	88
	5.5.3 Umformphase	90
	5.5.4 Vermessungsphase	90
<b>6</b>	<b>EXPERIMENTELLE VERIFIZIERUNG</b>	<b>92</b>
	<b>6.1 Versuchaufbau der Roboformingzelle</b>	<b>93</b>
	6.1.1 Gesamte Versuchsvorrichtung	93
	6.1.2 Umgeformte Bauteile	95
	<b>6.2 Überblick über die Versuche und Auswertungstools</b>	<b>98</b>
	6.2.1 Umformkräfte-Erfassung und -Auswertung	99
	6.2.2 Geometrie-Erfassung und -Auswertung	100
	<b>6.3 Werkstofffluss und Formänderung</b>	<b>104</b>
	<b>6.4 Fehlerbeschreibung</b>	<b>108</b>
	<b>6.5 Reproduzierbarkeit</b>	<b>112</b>
	<b>6.6 Versuchsplan zur Verifizierung der Umformparameter</b>	<b>118</b>
	<b>6.7 Abgleich der Umformparameter: Einfluss von Umformparameter auf Faltenbildung, Ausdünnung und Risse sowie Ermittlung der Umformkräfte während des Blechumformablaufs</b>	<b>120</b>
	6.7.1 Gegenhalterkantenradius und Spaltabstand zwischen Werkzeug und Gegenhalter	120
	6.7.2 Variation des Neigungswinkels	121
	6.7.3 Vergleich verschiedener Umformgeschwindigkeiten und Einfluss der Roboterhaltung während des Umformprozesses	123

6.7.4 Variation der Zustellung	127
6.7.5 Einfluss von verschiedenen Radien des Umformwerkzeugs	131
6.7.6 Einflüsse verschiedener Umformstufen	134
<b>6.8 Weitere Experimente und Ergebnisse</b>	<b>137</b>
6.8.1 Rauheit der Bauteiloberfläche	137
6.8.2 Umgeformte Freiformfläche	139
<b>7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK</b>	<b>142</b>
7.1 Zusammenfassung	142
7.2 Ausblick	143
<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>145</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</b>	<b>157</b>
<b>TABELLENVERZEICHNIS</b>	<b>163</b>
<b>ANHANG</b>	<b>165</b>