

Entwicklung des Polygon-Formens für sphärische Bauteile

Sphärisches Polygon-Formen

P. Müller, S. Hübner, H. Wester, J. Jepkens, S. Wehrmann, B.-A. Behrens

Das Polygon-Formen großer Strukturbauteile für die Luft- und Raumfahrtindustrie bringt zahlreiche Vorteile im Vergleich zu konventionellen Umformverfahren mit sich, wie geringere Materialbelastungen und weniger Vor- und Nachbearbeitungsschritte. Diese Technologie wurde jedoch bisher lediglich für die Herstellung zylindrischer oder konischer Rumpfsegmente eingesetzt. In dieser Arbeit soll das Polygon-Formen für die Herstellung sphärischer Segmente erweitert werden.

STICHWÖRTER

Luft- und Raumfahrt, Umformtechnik, Blechbearbeitung

1 Einleitung

Aufgrund des erheblichen Einflusses der Flugzeugmasse auf den Treibstoffverbrauch hat der Leichtbau in der Luftfahrt eine hohe wirtschaftliche Bedeutung. Eine Gewichtsreduzierung von Komponenten der Flugzeugstruktur bringt daher enorme ökonomische und ökologische Vorteile [1]. Aufgrund ihrer geringen Dichte werden neben faserverstärkten Kunststoffen und Titanlegierungen vor allem hochfeste Aluminiumlegierungen (wie die 7xxx-Serie) eingesetzt [2, 3]. Ein Beispiel für die Verwendung von Legierungen der 7xxx-Serie ist ihre Nutzung für hochbelastete Bauteile in der Rumpfstruktur [4]. Eine weitere Legierung, welche für die Herstellung von Rumpfteilen verwendet wird, ist EN AW2024 – T351.

Blechumformprozesse sind im Flugzeugbau eine wesentliche Technologie, um die gewünschten Geometrien von Schalelementen herzustellen [5]. Die Herstellung großflächiger Rumpfstrukturteile erfolgt meist durch Rollformen oder Streckziehen. Das Rollformen ist ein Verfahren zur Herstellung gebogener Blechteile. Eine mögliche Art von Rollformanlagen ist eine symmetrische Drei-Walzen-Anordnung [6]. Diese Technologie bietet günstige Belastungsbedingungen bei vergleichsweise geringen Kräften und wird in der Regel für das Umformen dicker Bleche verwendet [7]. Beim Streckziehen wird eine flache Blechplatte meist an zwei gegenüberliegenden Seiten eingespannt und dann durch die Einwirkung eines Formstempels in die gewünschte Form gebracht. Mit dem Streckziehen lassen sich je nach Stempelgeometrie auch sphärische Blechbauteile herstellen. Allerdings geht diese Technik mit einer hohen Materialbeanspruchung, begrenzter Maßgenauigkeit und unerwünschter Reduzierung der Blechdicke einher [7].

Eine weitere Methode zur Herstellung von Flugzeugrumpfteilen ist das inkrementelle Biegeverfahren, das Polygon-Formen genannt wird und von der Firma Deharde GmbH entwickelt und

Spherical Polygon-Forming

Polygon forming of large structural components for the aerospace industry brings numerous advantages compared to conventional forming processes, such as lower material stresses and fewer pre- and post-processing steps. So far, this technology has only been used for the production of cylindrical or conical fuselage segments. This work is about extending polygon forming to be used for the production of spherical segments.

patentiert wurde [8]. Dabei werden Aluminiumbleche durch schrittweise Umformung gebogen. Gemäß DIN 8586 dient das Biegen zur plastischen Verformung fester Bauteile (zum Beispiel Bleche), wobei der plastische Zustand im Wesentlichen durch Biegespannungen erzeugt wird [9]. Üblicherweise werden dafür spezielle Maschinen wie Pressen, Biege- oder Richtmaschinen eingesetzt [10].

Das Polygon-Formen ist eine besondere Art des Biegens. Sie eignet sich für die Herstellung von gebogenen, gedrehten und konischen Blechteilen, bei denen relevante geometrische Elemente wie Taschen, Bohrungen oder Aussparungen vor dem Biegeprozess erzeugt werden können. In [11] wurden Grundlagenuntersuchungen durchgeführt, um das Polygon-Formen für die Herstellung von herunterskalierten sphärischen Bauteilen anwenden zu können. Auf dieser Basis werden in diesem Beitrag Werkzeugaktivelemente zur sphärischen Umformung an einem skalierten Versuchswerkzeug zur Formgebung hochfester Aluminiumlegierungen, wie sie im Flugzeugbau verwendet werden, getestet.

2 Voruntersuchungen Polygon-Formen

Um das Polygon-Formen auf experimenteller Ebene zu untersuchen wurde am IFUM ein Versuchswerkzeug entwickelt und aufgebaut. Dieses wurde in einer hydraulischen Presse installiert und besteht im Wesentlichen aus einem Schwert und zwei Bettauflagern, die über Adapter-Platten mit der Presse verbunden werden (Bild 1).

Während eines Umformvorganges wird eine Biegung inkrementell in der umzuformenden Platine durch den Hub des Schwertes erzeugt. Die finale Biegegeometrie kann dabei sowohl durch den unteren Totpunkt, die Vorschubweite, den Vorschubpfad als auch den Bettabstand oder die Geometrie der Aktivkomponenten (Schwert und Bett) beeinflusst werden. Da die finale

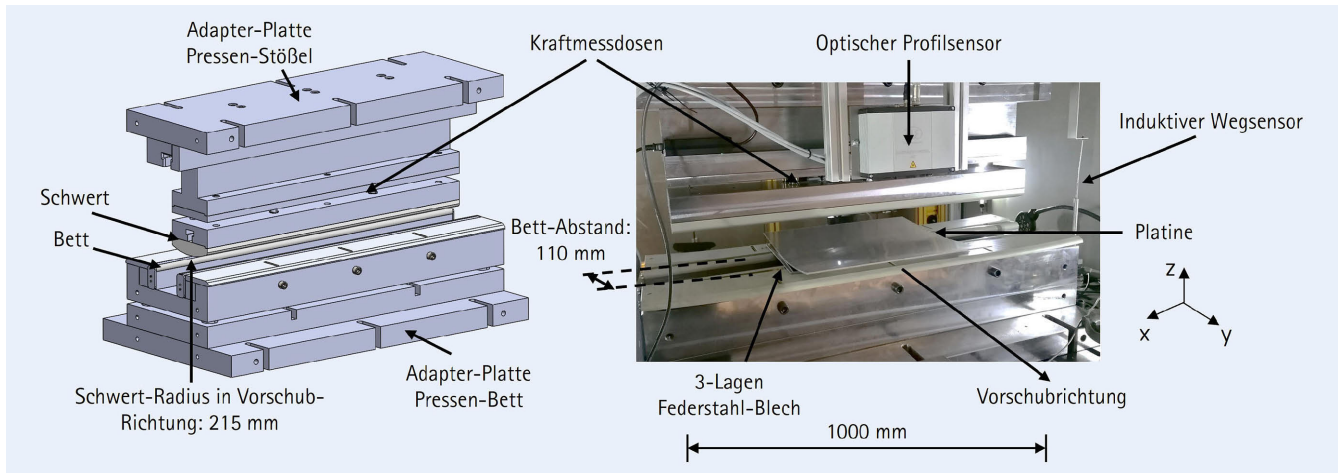


Bild 1. IFUM-Polygon Werkzeug. Foto: IFUM

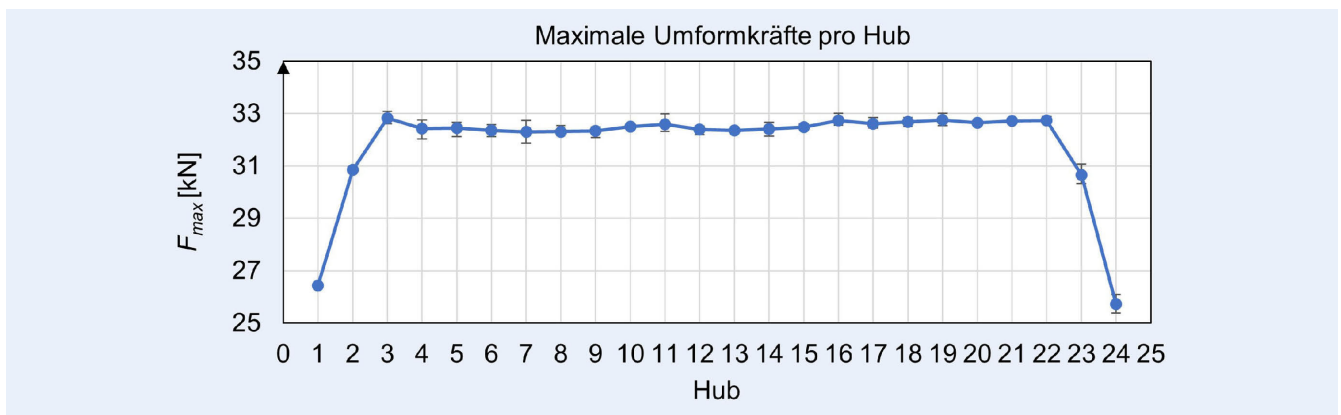


Bild 2. Maximale Umformkräfte pro Hub für eine zylindrische Polygon-Umformung. Grafik: IFUM

Geometrie schrittweise generiert wird, ist der Prozess je nach Wahl der Vorschubweite verhältnismäßig zeitaufwendig.

Um eine Abweichung der erzeugten von der angestrebten Zielgeometrie frühzeitig erkennen zu können, ist das Werkzeug mit verschiedenen Sensoren ausgestattet. Die Umformkraft wird mit vier Kraftmessdosen im Krafthauptfluss des Schwertes und der Umformweg mit einem induktiven Wegaensor erfasst. Ein optischer Profilsensor der Firma Mikro-Epsilon Messtechnik GmbH vermisst die lokal erzeugte Biegung nach jedem Hub. Mit definierten Prozesseinstellungen können so etwa die inline gemessenen Kräfte direkt einer lokal erzeugten Biegung zugeordnet und der Prozess bei Nichteinhaltung eines bestimmten Toleranzfeldes angepasst werden. Die Entwicklung dieser Prozessüberwachung ist unter anderem Teil des Forschungsprojektes „Vereinigung innovativer Einzelprozesse in der Herstellung von Rumpfschalen“ (AgaPolCo).

In [11] wurde eine gerade Schwert-Bett-Geometrie ohne Radius in Längsrichtung eingesetzt, um die Herstellbarkeit zylindrischer Bauteile mit dem IFUM-Werkzeug zu untersuchen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte nachgewiesen werden, dass der Prozess in der Lage ist, zylindrische Bauteile mit einem geometrischen Standardabweichungsfehler von nur 2,76 % herzustellen [11]. Darauf aufbauend wird im Folgenden der Prozesskraft-Verlauf für die zylindrische Umformung von drei 500 mm x 500 mm AA2024-T351-Platinen mit einer Blechdicke von 3,2 mm betrachtet. Es wird ein Bett-Abstand von 110 mm, ein

unterer Totpunkt (UT) von $-0,8$ mm und eine Vorschubweite von 20 mm nach jedem Hub eingestellt. Als Auflager werden drei je 1,5 mm dicke Federstahlbleche aus 1.1274 auf dem Bett positioniert. Hiermit wird ein bettseitiger, gleichmäßiger Gegen-Druck der umzuformenden Platinen angestrebt, die ansonsten ohne den Federstahl nur seitlich an den zwei Bettkanten aufliegen würden. In Bild 2 sind die gemittelten maximalen Umformkräfte für alle Hübe dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass die Umformkräfte für die ersten und letzten beiden Hübe deutlich niedriger liegen und in der Mitte ein nahezu horizontales Plateau bilden. Dies ist darin begründet, dass das Schwert in den Eckbereichen primär einseitig in die Platine gedrückt und somit keine beidseitige Biegung erzeugt wird sowie ein weniger steifes Gegenlager vorliegt. Zudem ist hier auffällig, dass sich der Standardabweichungsfehler der Prozesskräfte für jeden Hub durchgehend unter 3 % befindet. Ein ermitteltes Kraftprofil kann somit für bekannte Prozessparameter der erzeugten Zielgeometrie zugeordnet werden.

Im Folgenden wird die Geometrie der Aktivkomponenten des IFUM-Werkzeuges verändert, um die Herstellbarkeit sphärischer Bauteile zu untersuchen.

3 Versuchsaufbau und Durchführung

Die Versuche werden am IFU-Polygon-Werkzeug durchgeführt. Als Aktivelemente kommen additiv aus dem Material

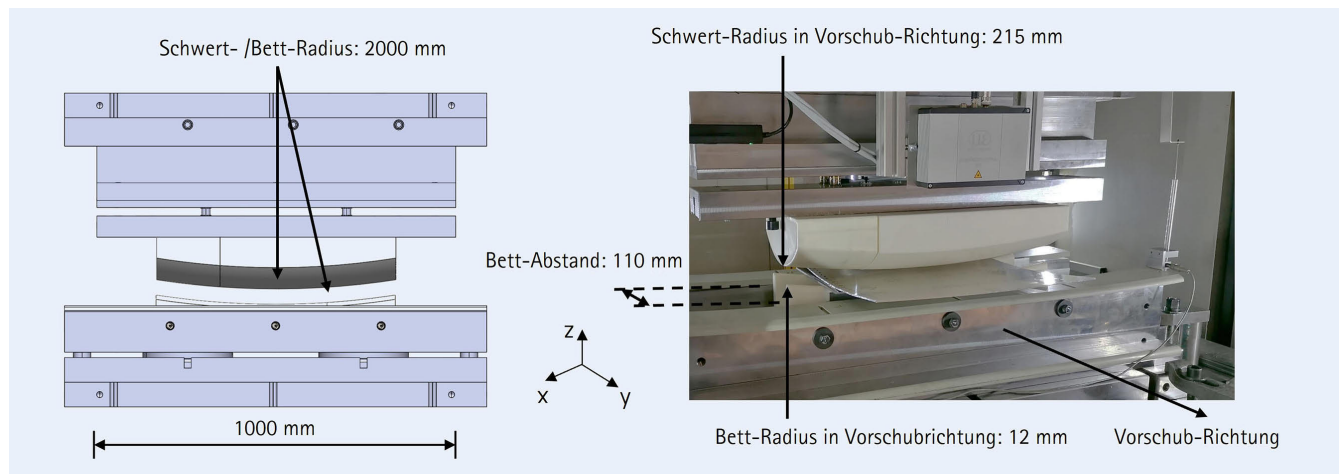


Bild 3. Aktivelemente zur sphärischen Umformung im IFUM-Polygon-Werkzeug. Foto: IFUM

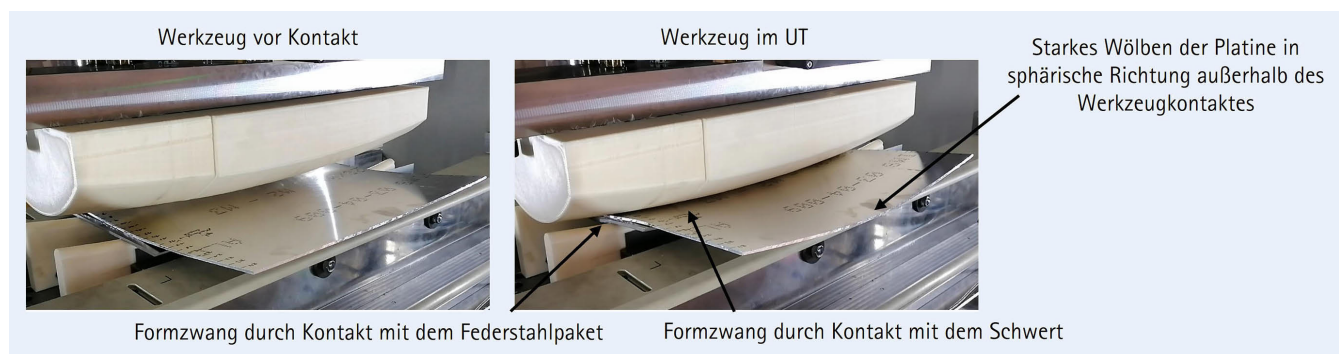


Bild 4. Biegen der Platine außerhalb des Werkzeugkontaktes. Foto: IFUM

ABS gedruckte Schwert- und Bett-Segmente zum Einsatz. Das Schwert hat eine rundliche bombierte Form mit einem Radius quer zur Vorschubrichtung der Platine von $r = 2000 \text{ mm}$ und einem Radius in Vorschubrichtung der Platine von $r = 215 \text{ mm}$. Das Bett besteht aus zwei Auflagern, die eine konkave Gegenform zum Schwert bilden und in einem Abstand von 110 mm mittig unter dem Schwert positioniert sind. Der Auflager-Radius der beiden Bett-Segmente in Vorschubrichtung beträgt $r = 12 \text{ mm}$. Auf dem Bett wird ein Federstahlpaket bestehend aus drei jeweils $1,5 \text{ mm}$ dicken Blechen positioniert. Der Federstahl besteht aus dem Material 1.1274 und soll eine gleichmäßige Gegenform unterhalb der umzuformenden Platine gewährleisten. Somit bleibt die Platine auch in den seitlichen Gebieten unter dem Schwert im Werkzeugkontakt, da diese von dem Federstahlpaket von unten gegen das Schwert gedrückt wird.

Der untere Totpunkt für jeden Hub wird konstant auf $0,8 \text{ mm}$ unterhalb der oberen Profillinie des Bettes festgelegt. Die umzuformenden Platinen haben eine Grundfläche von $500 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$, eine Blechdicke von $t = 3,2 \text{ mm}$ und bestehen aus der hochfesten Aluminiumlegierung AA2024-T351. Die Platinen werden nach jedem Hub um 20 mm in Vorschubrichtung (Bild 3) verschoben, sodass für die gesamte inkrementelle Umformung 24 Einzelhübe notwendig sind.

Die Walzrichtung der Platinen verbleibt stets quer zur Vorschubrichtung. Der Prozess geschieht weggesteuert auf einer hydraulischen Umformpresse des Typs „HDZ400“ der Firma Dunkes GmbH. Der Versuchsaufbau ist in Bild 3 dargestellt. Die

Umformgeschwindigkeit wird auf 10 mm/s festgelegt. Die Versuche finden bei Raumtemperatur (20°C) statt und werden zur statistischen Absicherung dreimal wiederholt.

4 Ergebnisse

Durch den Kontakt des bombierten Schwertes erhält die Platine eine Biegung sowohl in Vorschub- (zylindrische) als auch quer zur Vorschub- (sphärische) Richtung. Auffällig ist hier, dass sich die Platine außerhalb der direkten Werkzeugkontakt-Zone in sphärische Richtung wölbt. Diese Biegung ist stärker als im vollständigen Formzwang zwischen den Aktivelementen (Bild 4).

Eine Erklärung können durch den Werkzeugeingriff erzeugte überlagerte Druck- und Spannungszustände im Material sein, die die Platine außerhalb des Werkzeugkontaktes in eine Biegung zwingen. Auf der Platinen-Oberseite würden sich Druck-Spannungen in zwei Achsen und auf der Platinen-Unterseite Zugspannungen in zwei Achsen überlagern. Dieser Effekt wurde in [11] an einem herunterskalierten Vorversuchswerkzeug beobachtet und hier somit bestätigt.

Die Biegung nimmt in sphärische Richtung mit wachsendem Abstand zur Werkzeugkontaktzone für die hier betrachteten Dimensionen zu. Daher ist zu vermuten, dass die sphärischen Biegelinien in den Randbereichen ausgeprägter als in den mittleren Bereichen der Platinen sind. Diese Hypothese wird durch eine geometrische Vermessung im Folgenden bestätigt.

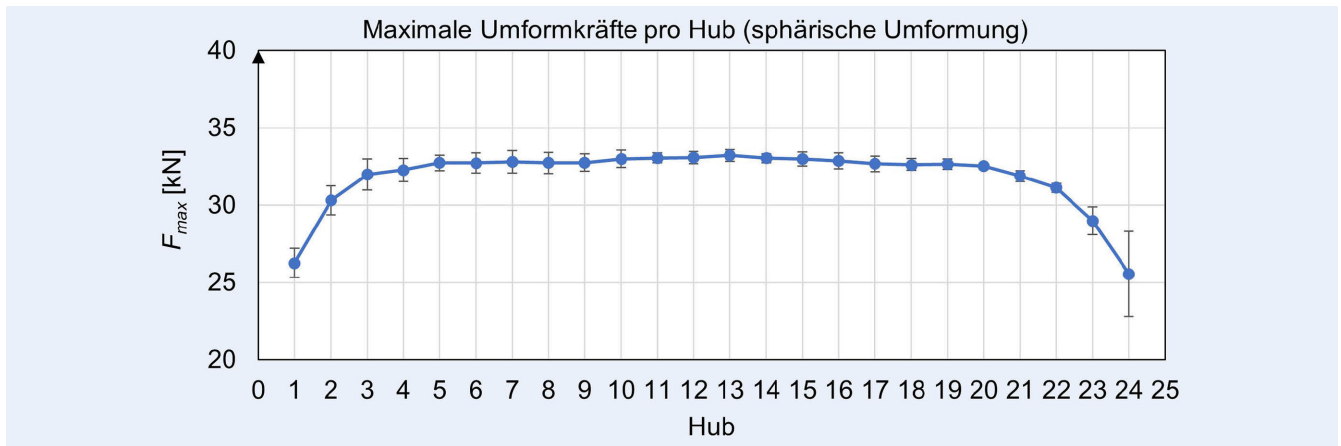


Bild 5. Maximale Umformkräfte pro Hub für eine sphärische Polygon-Umformung. Grafik: IFUM

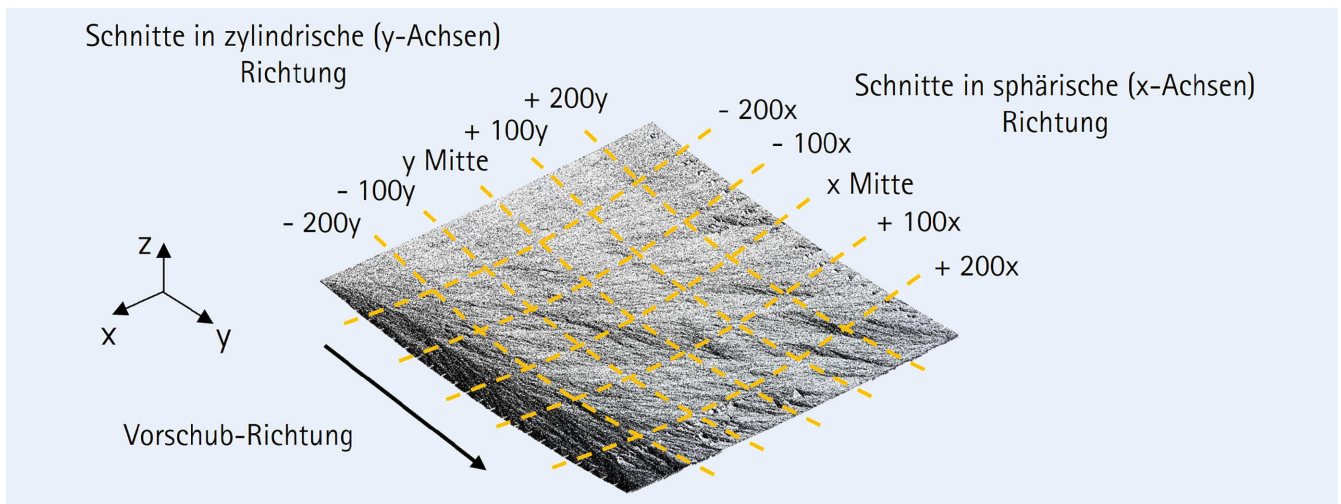


Bild 6. Vermessung der Biegelinien einer sphärischen Platine. Grafik: IFUM

4.1 Auswertung der Umformkräfte

In Bild 5 ist der Verlauf der gemittelten maximalen Umformkräfte über die Hub-Zahl für drei sphärische Umform-Versuche dargestellt.

Analog zur Auswertung der Kraftverläufe für die zylindrische Umformung in Bild 2 liegen die Kräfte auch hier für die ersten und letzten zwei Hübe niedriger. Im mittleren Bereich der Platine weist die Kraft ein nahezu konstantes Niveau auf. Auffällig ist, dass, obwohl die ersten 23 Hübe eine hohe Reproduzierbarkeit mit einem Standardabweichungsfehler von $< 3\%$ aufzeigen, der letzte Hub einen relativ hohen Standardabweichungsfehler von circa 10% zeigt. Eine Erklärung ist, dass die Platine bereits fast vollständig vor dem letzten Hub gebogen ist und damit angestellt im Werkzeug liegt. Das Schwert taucht demnach nicht in eine ebene, sondern eine einseitig gebogene Fläche ein. Dies kann ein teilweises Herausdrücken der Platinenkante aus der Umformzone beim Zusammenfahren des Werkzeuges verursachen. Der Vorschub geschieht in den aktuellen Versuchen durch ein manuelles Positionieren anhand von Anschlagmarken. Kleinere Abweichungen der Positionierung könnten hier eine Relativbewegung der Platinen quer zur Werkzeugbewegung verursachen. Eine präzisere Prozessführung sollte zu einer Verringerung dieses

Fehlers führen. Insgesamt lässt sich jedoch eine gute Reproduzierbarkeit der Versuche nachweisen.

4.2 Erzeugung einer sphärischen Geometrie

Im Folgenden werden die Bauteile mit einem optischen Messsystem „Atos 2 400“ der Firma Carl Zeiss GOM Metrology GmbH vermessen. Bild 6 zeigt ein eingescanntes sphärisches Profil. Es werden die Biegelinien in zylindrische (y-Achse in Bild 6) Richtung und in sphärische (x-Achse in Bild 6) Richtung ermittelt. Die Auswertung geschieht für fünf Schnittebenen sowohl in x-, als auch y-Achsenrichtung in einem Abstand von jeweils 100 mm ausgehend von den Symmetrielinien beider Achsen.

Bild 7 zeigt die Profil-Schnittlinien des sphärischen Biegeanteiles für die fünf Auswertepositionen gemäß Bild 6. Die Profilschnitte sind über ein lokales Koordinatensystem ausgewertet dargestellt und nicht am Massenschwerpunkt ausgerichtet.

Es ist zu erkennen, dass eine Biegekomponente in sphärischer Richtung, jedoch keine ideal kreisförmige Kontur erzeugt werden konnte. Gerade im mittleren Bereich der Platinen ($-100x$ bis $+100x$) zeigen die Biegelinien in den Eckbereichen eine Krümmung und zwischen circa 100 mm bis 400 mm einen nahezu flachen Verlauf. Für die Randbereiche ($-200x$ und $+200x$) ist auffällig, dass hier eine fast kreisförmige Biegung erzeugt werden

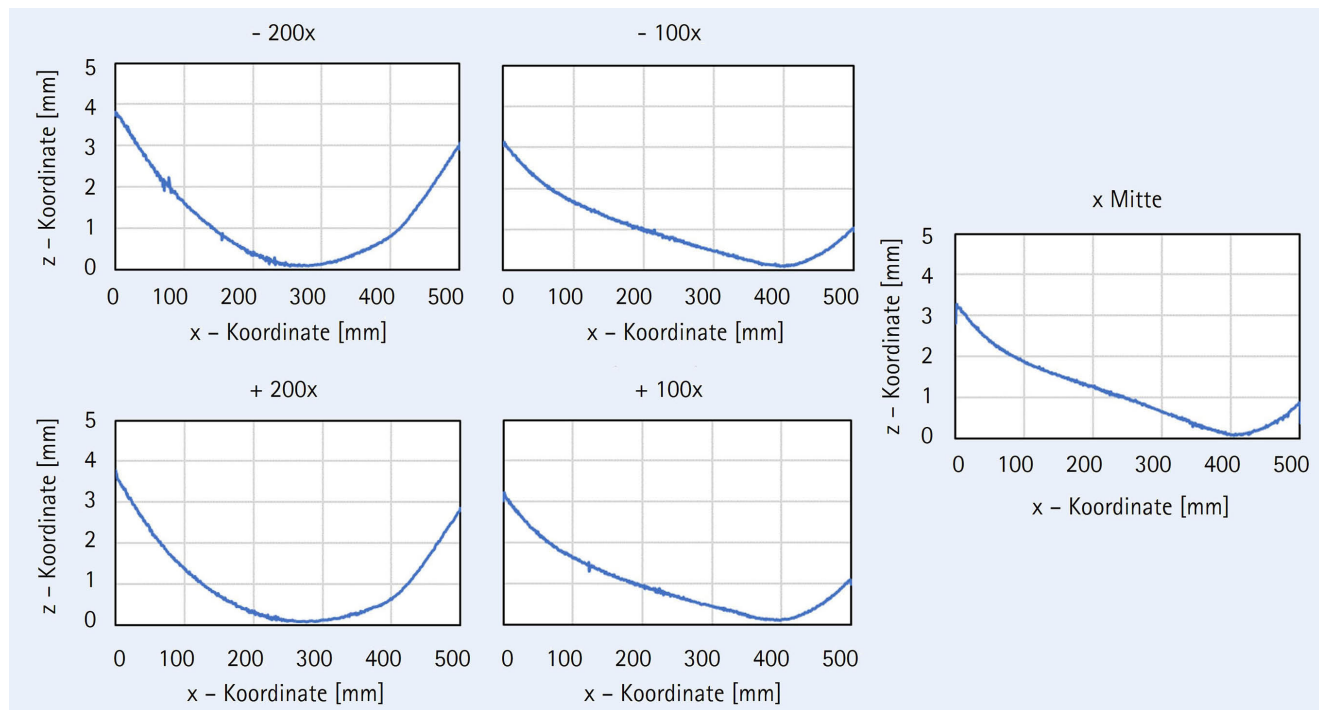


Bild 7. Biegelinien in sphärische (x-Achsen-) Richtung. Grafik: IFUM

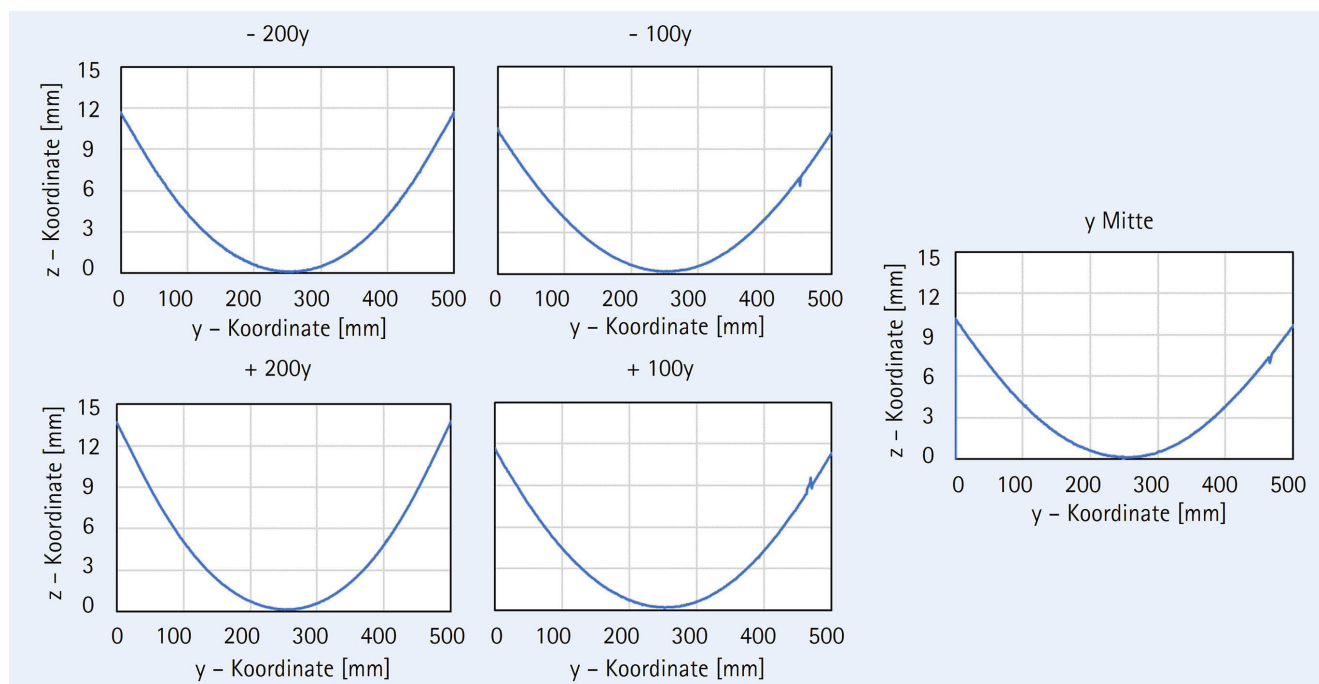


Bild 8. Biegelinien in zylindrische (y-Achsen-) Richtung. Grafik: IFUM

konnte. Dies kann mit dem verstärkten Biegen außerhalb der Zone des Werkzeugkontaktes erklärt werden. Wie Bild 4 zeigt, entsteht die größte Formänderung durch Beanspruchungen außerhalb des Werkzeugeingriffs. Taucht das Schwert in die Mittellinie (x Mitte) ein, ist der Abstand zum Rand maximal, sodass dort die größte Biegung entsteht. Analog dazu ist die direkt induzierte Formänderung im Werkzeugkontakt geringer, sodass die finalen Biegelinien hier schwächer ausgeprägt sind.

Bild 8 zeigt die Schnittlinien des Profils mit zylindrischen Biegeanteilen für die fünf Auswertepositionen gemäß Bild 6.

Es ist zu erkennen, dass die Biegung in zylindrische (y-Achse in Bild 6) Richtung ausgeprägter und im Vergleich zur sphärischen Komponente homogener über die Tiefe der Platinen ist. Die Biegung zeigt hier eine nahezu stetige rundliche Kontur. Im Gegensatz zur sphärischen Komponente, bei der die Formkontur primär über die Werkzeugform vorgegeben ist, entsteht die zylindrische Formkontur primär über die Einstellung des Bettabstan-

des und des unteren Totpunktes des Schwertes. Tendenziell lässt sich auch hier eine leicht stärkere Ausprägung der Biegung in den Randbereichen (-200y und +200y) als im Zentrum feststellen. Eine Erklärung könnte sein, dass das Material in der Platinenmitte bereits vor dem Erreichen des Schwertes eine Beanspruchung durch die von der sphärischen Kontur entstehenden inneren Spannungen erfährt. Dadurch würde sich in diesem Bereich das Restform-Änderungsvermögen reduzieren, was zu einer schwächer ausgeprägten Kontur durch den Werkzeugkontakt führt.

Da die Platinen mit jedem Hub Biegeanteile in sphärische und zylindrische Richtung als auch Druck- und Zug-Spannungen außerhalb des Werkzeugeingriffs erfahren, die ihrerseits eine plastische Deformation verursachen, verändern sich die Prozessbedingungen für jeden einzelnen Hub. Das komplexe Zusammenspiel dieser Einflussgrößen müsste für die Erzeugung enger Fertigungstoleranzen grundlegender untersucht werden. Für die hier durchgeführten Untersuchungen lässt sich nur die Erkenntnis ableiten, dass mit dem Werkzeugkonzept durch inkrementelles Biegen sphärische Komponenten erzeugt werden können. Die Erzielung einer symmetrischen Rumpfschale stellt allerdings noch eine Herausforderung dar.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein inkrementeller Umformprozess zur Herstellung sphärischer Bauteile aus einer in der Luftfahrt häufig verwendeten hochfesten Aluminiumlegierung entwickelt und getestet. Als Werkzeugaktivelemente kamen ein bombiertes Schwert und ein Federstahlpaket, welches auf einem konkaven Bett als Gegenlager positioniert wurde, zum Einsatz. Durch die in 24 Hübten stattfindende schrittweise Umformung konnten rechteckige Platinen in eine Form mit zylindrischen und sphärischen Biegeanteilen umgeformt werden.

Es hat sich gezeigt, dass die Biegung in sphärische Richtung primär außerhalb der Werkzeugkontaktzone durch eine Überlagerung von inneren Spannungen über die Blechtiefe stattfindet. Dies verursachte eine ungleichmäßige Biegung der Platinen, die somit am Rand eine stärkere Biegung als in den mittleren Bereichen aufwiesen. Die Biegeanteile in zylindrische Richtung waren homogener, zeigten jedoch eine stärkere Biegung in den Außenbereichen. Zur Einhaltung engerer Formtoleranzen müsste der Prozess in zukünftigen Arbeiten weiterentwickelt werden. Dies kann zum einen durch die Entwicklung eines besseren Verständnisses der sich individuell für jeden Hub ändernden Prozessbedingungen geschehen. Zum anderen können weiterentwickelte Umformstrategien wie eine Änderung des Umformpfades oder angepasste Werkzeuggeometrien betrachtet werden.

Literatur

- [1] Immarigeon, J.-P.; Holt, R.T.; Koul, A.K. et al.: Lightweight materials for aircraft applications. *Materials Characterization* 35 (1995) 1, pp. 41–67
- [2] Dursun, T.; Soutis, C.: Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys. *Materials & Design* (1980–2015) 56 (2014) , pp. 862–871
- [3] Behrens, B.-A.; Hübner, S.; Vogt, H.: Formability of 7000 aluminum alloys in warm and hot forming condition. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 418 (2018) #012027
- [4] Uffelmann, D.: Take-Off für hochfestes Aluminium im Automobilbau. *ATZ extra Karosserie Werkstoffe* 15 (2010) 10, S. 22–27
- [5] Koehler, W.; Plege, B.; Sahm, K.F. et al.: Metal Forming: Specialized Procedures for the Aircraft Industry. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering (2017), doi. org/10.1016/B978-0-12-803581-8.01939-1
- [6] Vollertsen, F.; Sprenger, A.; Kraus, J. et al.: Extrusion, channel, and profile bending: a review. *Journal of Materials Processing Technology* 87 (1999) 1–3, pp. 1–27
- [7] Heller, B.; Chatti, S.; Schikorra, M. et al.: Blechbiegen. In: Siegert, K. (Hrsg.): *Blechumformung*. Heidelberg: VDI-Buch Springer 2015, S. 141–221
- [8] Wilken, E.; Lautenbach, S.; Frerichs, H. et al.: Verfahren und Anordnung zur Formänderung eines Plattenartigen Werkstücks. Patent WO2020/147935A1, 2020
- [9] DIN 8586:2003–09: Fertigungsverfahren Biegeumformen – Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth Verlag 2003
- [10] Doege, E.; Behrens, B.-A.: *Handbuch Umformtechnik*. Heidelberg: Springer Verlag 2010
- [11] Müller, P.; Behrens, B.-A.; Hübner, S. et al.: Development of polygon forming processes for aerospace engineering, *Materials Research Proceedings*. 25 (2023), pp. 69–76



Philipp Müller, M.Sc. 
Foto: IFUM

Prof. Dr.-Ing. **Bernd-Arno Behrens**

Dr. Ing. **Sven Hübner**

Hendrik Wester, M.Sc.

Jan Jepkens, M.Sc.

Leibniz Universität Hannover, Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)
An der Universität 2, 30823 Garbsen
Tel. +49 511 / 762-2264
t.hoffmann@ifum.uni-hannover.de
www.ifum.uni-hannover.de

Simon Wehrmann, M.Sc.

Deharde GmbH
Am Hafen 14a, 26316 Varel
Tel. +49 4451 / 9133878
s.wehrmann@deharde.de
www.deharde.de/de

FÖRDERHINWEIS

Gefördert durch die Investitions- und Förderbank Niedersachsen (NBank) – Verbundforschungsprojekt „Vereinigung innovativer Einzelprozesse in der Herstellung von Rumpfschalen“ (AgaPolCo).

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)