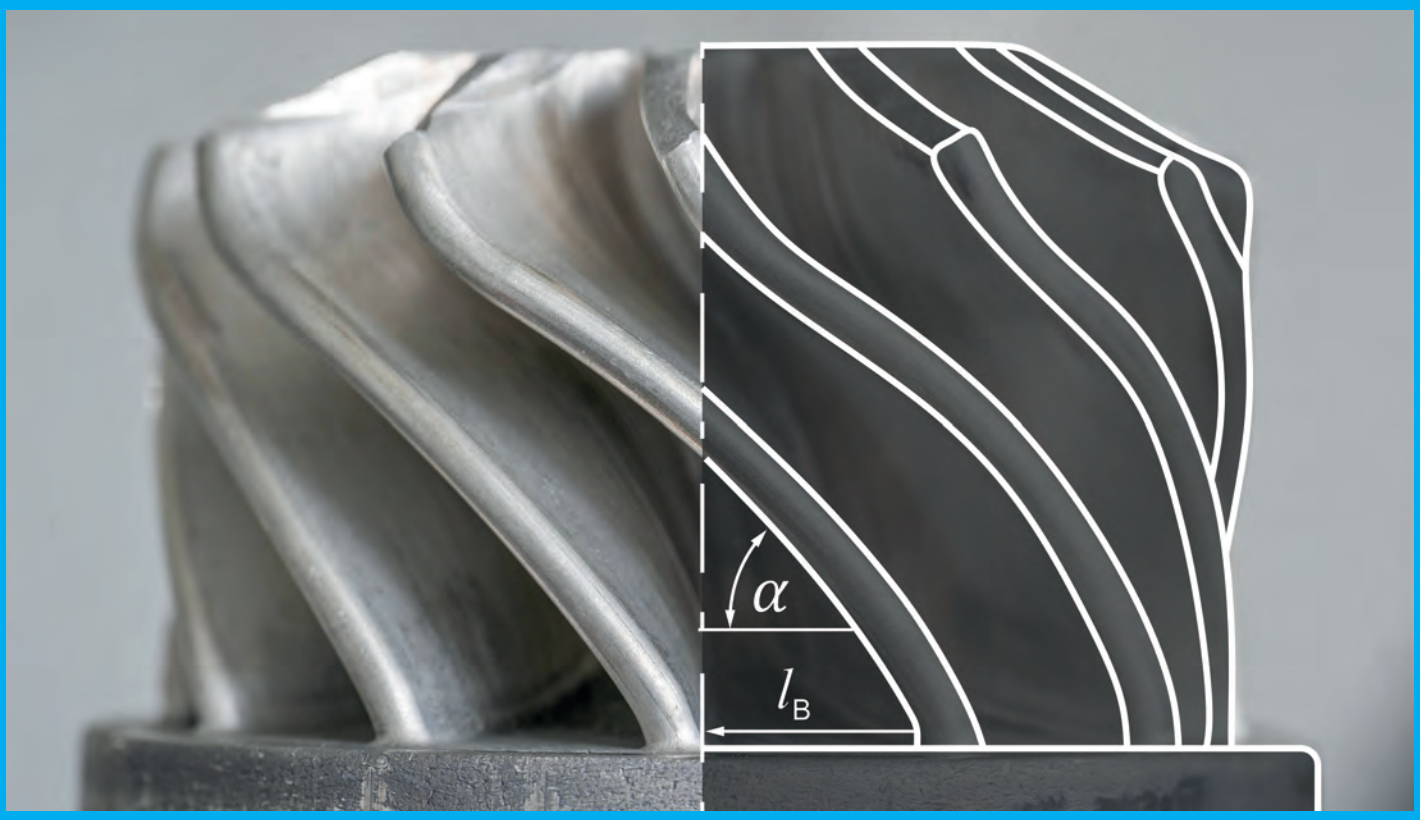
HeliForm – Einstufiges Fließpressen helixförmiger near-net-shape-Verdichterräder aus EN AW-6082



Die Herstellung von Aluminiumbauteilen mit weit vom Kern auskragenden helixförmigen Elementen mit geringer und sich verändernder Steigung erfolgt heutzutage vorwiegend durch urformende oder spanende Fertigungsverfahren. Im Projekt *HeliForm* wurde durch Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Umformtechnik (IFU) der Universität Stuttgart, der Friedrich Kretz GmbH & Co. KG und der HERRMANN IDB GmbH eine neuartige Prozesstechnik zum einstufigen Fließpressen von near-net-shape-Verdichterrädern aus EN AW-6082 entwickelt und auf einer industriellen Anlage erprobt.

Der neuartige HeliForm-Prozess erweitert das Verfahrensspektrum zur Herstellung von helixförmigen Bauteilen erheblich und ermöglicht uns mittelständischen Fließpressunternehmen eine Ausweitung des bestehenden Produktspektrums.

Dr. Thorsten Kretz

Unsere zukünftigen Forschungsarbeiten betreffen die ganzheitliche Betrachtung der Prozesskette bestehend aus Vormaterial, Umformung, Wärmebehandlung und Zerspanung durch geeignete Modellierungs- und Vorhersagemethoden. Die verbleibenden Eigenspannungen nach dem Fräsen stellen dabei einen Handlungsschwerpunkt dar.

Prof. Mathias Liewald

Der Einsatz neuester Steuerungstechnologien für die Synchronisation der drehenden Matrize mit dem Pressenstößel ermöglichte im Projekt HeliForm trotz der Vielzahl an komplexen Wechselwirkungen mit anderen Prozessparametern eine zuverlässige Ausformung der gewünschten Helixgeometrie.

Thomas Herrmann

Der erfolgreiche Abschluss des Projekts HeliForm hat gezeigt, dass auch in wirtschaftlich schwierigen Zeiten innovative Lösungsansätze durch Zusammenarbeit von Forschungseinrichtungen und mittelständischen Unternehmen mit hoher Dynamik erarbeitet werden können. Wir freuen uns auf den zukünftigen Übertrag der Erkenntnisse in die Produktionslinie.

Dr. Karl C. Grötzinger

AUTOREN

Dr.-Ing. Thorsten Kretz

ist Geschäftsführer
der Friedrich Kretz GmbH & Co. KG
in Pforzheim

Thomas Herrmann

ist Geschäftsführer
der HERRMANN IDB GmbH
in Sulz am Neckar

Dr.-Ing. Karl C. Grötzinger

ist seit März 2025 Assistant Professor
am Center for Advanced Die Engineering and Technology an der Gifu Universität in Japan, zuvor wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik (IFU) an der Universität Stuttgart

Radu A. Matei, M.Sc.

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut
für Umformtechnik (IFU) an der Universität
Stuttgart

**Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c.
Mathias Liewald MBA**

leitet das Institut für Umformtechnik (IFU)
an der Universität Stuttgart

Verdichterräder mit komplexen Geometrien stellen einen wesentlichen Bestandteil zur Wirkungsgradsteigerung heutiger strömungstechnischer Anlagen dar. Neuere Anwendungen betreffen Brennstoffzellenluftversorgungssysteme neben etablierten Applikationen in Abgasturboladern der Verbrennungsmotorentechnik. Die eingesetzten Verdichterräder sind durch Schaufeln mit komplexer helixförmiger Geometrie gekennzeichnet. Die aus dem Stand der Technik bekannten umformtechnischen Verfahren zur Herstellung von Bauteilen mit helixförmigen Formelementen sind dadurch gekennzeichnet, dass die Formgebung der gleichbleibenden Helix beim Vorwärtshub erfolgt. Solche Verfahren haben bislang vorwiegend für schrägverzahnte Bauteile mit gleichbleibendem Helixwinkel $\alpha > 60\,°$ (Schrägungswinkel $\beta < 30\,°$) Anwendung gefunden. Bei diesen Prozessen erfolgt die Helixerzeugung durch Vorwärts- [1, 2] oder Quer-Fließpressen [3]. Weiterhin ist ein Verfahren bekannt, bei dem durch Abstrecken über einen formgebenden Dorn eine helixförmige Innengeometrie an napfförmigen Hohlbauteilen erzeugt wird [4]. Ein mögliches Verfahren zur Herstellung von Bauteilen mit sich verändernder Helixsteigung ist aus der Produktion von Wendelbohrern bekannt. Hierbei dient ein Rohteil mit Längsnuten als Basis für die anschließende Helixerzeugung durch überlagerte Axial- und Rotationsbewegung gegenüber einer feststehenden Kulisse [5].

In diesem Beitrag wird der neuartige *HeliForm*-Prozess zur Erweiterung der Verfahrensgrenzen vorgestellt, der die Vorzüge der bestehenden Verfahren eint. Die herstellbaren Bauteile

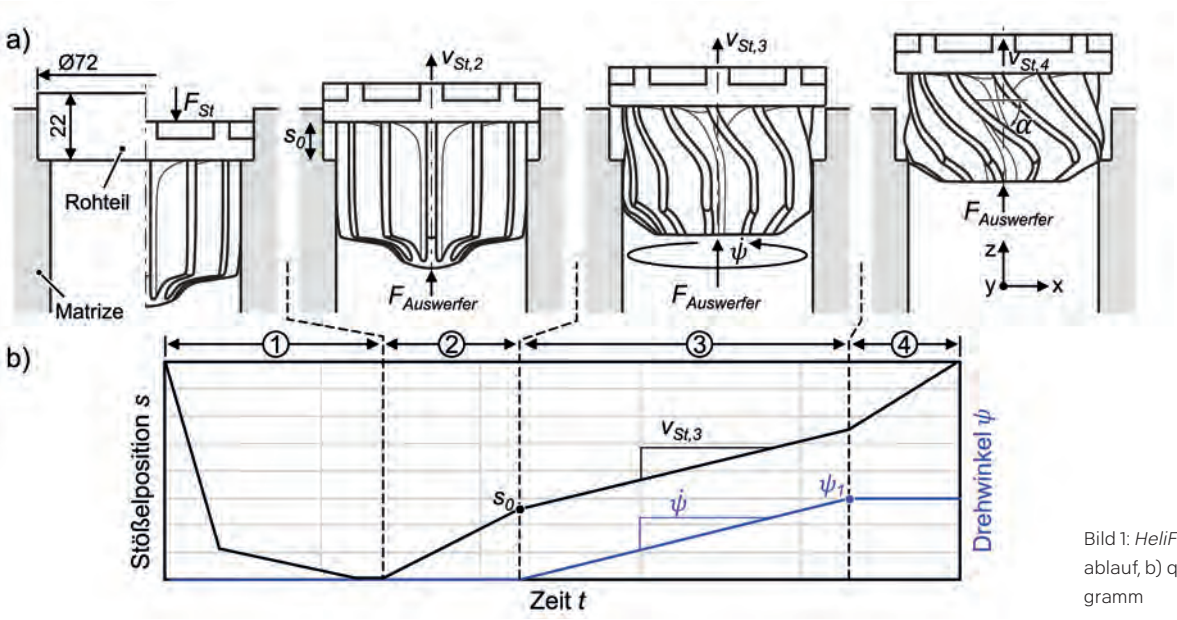


Bild 1: *HeliForm*-Prozess: a) Verfahrensablauf, b) qualitatives Bewegungsdiagramm

sind durch weit vom Kern auskragende Formelemente mit sich veränderbarem, relativ geringem Helixwinkel $\alpha < 60$ ° gekennzeichnet. Die Ergebnisse der simulativen und experimentellen Untersuchungen zeigen, dass durch diese Neuentwicklung near-net-shape-Verdichterräder aus EN AW-6082 auf einer industriellen Anlage versagensfrei hergestellt werden können.

VERFAHRENSBESCHREIBUNG

Der *HeliForm*-Prozess ermöglicht die einstufige Herstellung eines near-net-shape-Verdichterrads ausgehend von einem zylindrischen Rohteil aus EN AW-6082. Bild 1 a) zeigt die vier Phasen des Verfahrensablaufs. In der ersten Prozessphase erfolgt im Vorwärtsbub die Extrusion der vom Bauteilkern weit auskragenden Formelemente. Nach Erreichen des unteren Totpunkts wird die zweite Phase eingeleitet, das axiale Abheben des Bauteils von der Matrize. Hierbei erfolgt der Stößelrückhub mit Auflast des Auswerferzylinders. In diesem axialdrucküberlagerten Zustand wird das umgeformte Bauteil um den Weg s_0 von der Matrize abgehoben. Eine der reduzierten Rückzugsgeschwindigkeit $v_{St,3}$ überlagerte, positionsgesteuerte Drehbewegung $\dot{\psi}$ der Matrize führt in der dritten Prozessphase zur Erzeugung einer Helixgeometrie. Nach Erreichen des Drehwinkels ψ_1 erfolgt in der vierten Prozessphase das vollständige Auswerfen des Bauteils aus der Matrize durch weitere Axialbewegung des Auswerfers mit erhöhter Stempelrückzugsgeschwindigkeit $v_{St,4}$. Ein qualitatives Diagramm der Axialbewegung des Stempels und der Drehbewegung der Matrize über der Zeit ist in Bild 1 b) dargestellt.

SIMULATIVE UNTERSUCHUNGEN

Die Prozessentwicklung basierte auf numerischen Untersuchungen, die insbesondere zur Definition der Prozesskinematik und zur belastungsgerechten Werkzeugauslegung dienten. Zur Analyse des Werkstoffflusses wurde am Institut

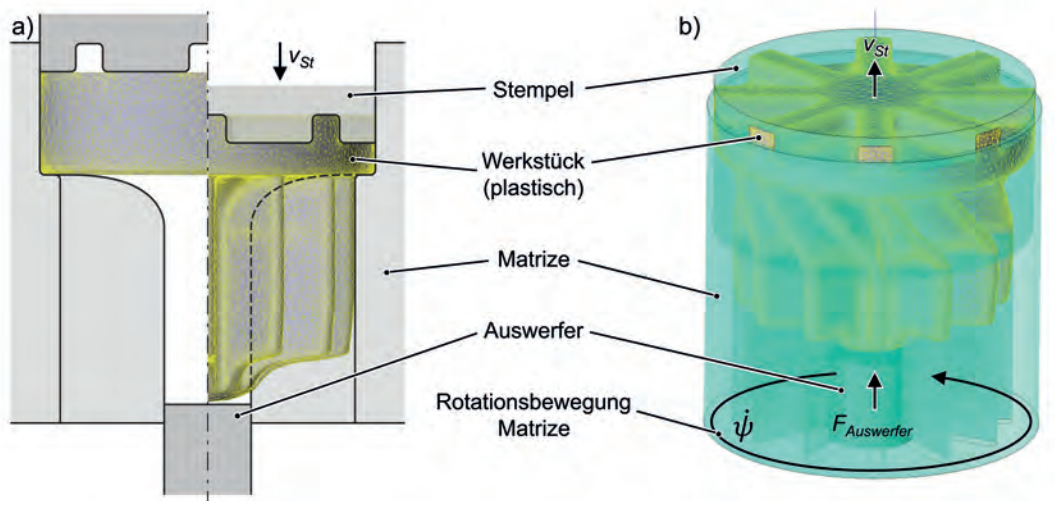


Bild 2: 3D-Simulationsmodell in QForm UK 11: a) Vorwärtsfließpressen (vereinfachte Werkzeugdarstellung), b) Helixerzeugung während des Rückhubs

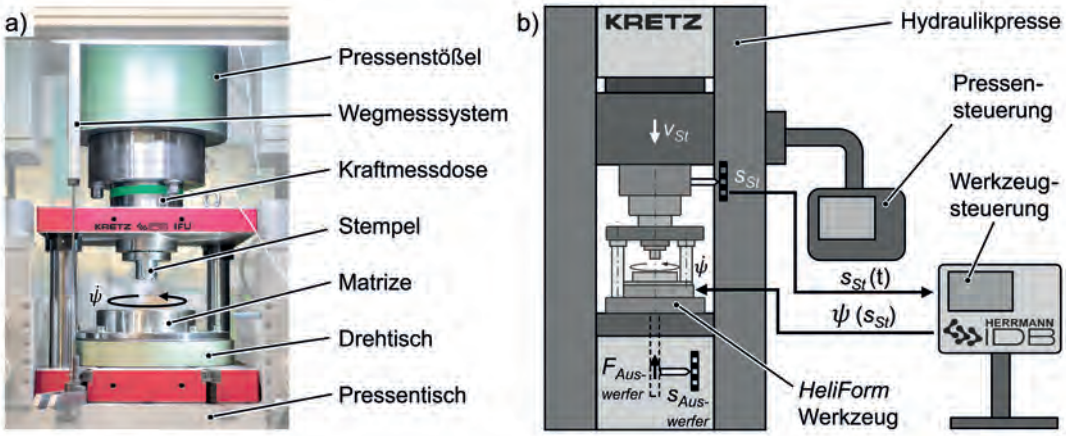


Bild 3: a) HeliForm-Werkzeugsystem, b) Presse mit Steuerungstechnik

für Umformtechnik ein dreidimensionales Vollmodell in QForm UK 11 erstellt. Die Ausgangstemperatur des rein plastisch modellierten Werkstücks aus EN AW-6082 betrug T_0 = 300 °C. Reibungseffekte zwischen Werkstück und Werkzeug wurden durch das Scherreibungsmodell mit einem Reibfaktor m = 0,4 abgebildet. Bild 2 a) zeigt das Simulationsmodell mit vereinfachter Darstellung der Werkzeuge für den ersten Prozessschritt: das Vorwärtsfließpressen der Formelemente zu Prozessbeginn und im unteren Totpunkt. Der zweite Prozessschritt, die Helixherstellung im Rückhub durch überlagerte Axial- und Drehbewegung, ist in Bild 2 b) mit transparenten Werkzeugkomponenten dargestellt. Die Vernetzung von Werkstück und Werkzeugen erfolgte durch Tetraederelemente unter Verwendung einer adaptiven Netzanpassung.

EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN

Der neuartige *HeliForm*-Prozess wurde auf einer industriellen Fließpressanlage bei der Friedrich Kretz GmbH & Co. KG in Pforzheim erprobt. Die Simulationsergebnisse dienten der Auslegung und Entwicklung eines Werkzeugsystems, das die überlagerte Dreh- und Axialbewegung während des Auswerfprozesses ermöglicht. Bild 3 a) gibt einen Blick in den Presseneinbauraum mit dem *HeliForm*-Werkzeugaufbau. Das formschlüssig verdrehgesicherte Stempelwerkzeug und ein Messaufnehmer zur Erfassung der Prozesskraft F_{St} sind im Werkzeugoberteil integriert. Das Werkzeugunterteil umfasst die formgebende Matrize, die in den Drehtisch montiert ist. Ein Servomotor dient als Antrieb für die Dreheinheit.

Für die experimentellen Untersuchungen kam eine hydraulische Presse vom Typ Lauffer VPS1250 mit einer maximalen Presskraft F_{max} = 12.500 kN zum Einsatz. Die für diesen Prozess angepasste Pressensteuerung ermöglichte die Definition maßgeschneiderter Geschwindigkeitsprofile für den Stößelrückhub, um so die Dynamikgrenzen der synchronisierten Drehachse zu berücksichtigen und gleichzeitig die Taktzeit gering zu halten. Das Hydrauliksystem ermöglichte weiterhin einen Auflastbetrieb des Auswerfers, der zu einer Druckspannungsüberlagerung im Bauteil während des Rückhubs führte und so das Versagensverhalten beeinflusste. Das Pressensystem und die Steuerungsperipherie sind schematisch in Bild 3 b) dargestellt. Während des Prozesses wurden die Presskraft F_{St}, die Stößelposition s_{St} sowie die Auswerferposition $s_{Auswerfer}$ erfasst. Die Ansteuerung der Verdrehachse erfolgte durch eine separate Werkzeugsteuerung, die von der HERRMANN IDB GmbH für den *HeliForm*-Prozess entwickelt und realisiert wurde. Diese Steuerung verwendet als Eingabegröße die gemessene Stößelposition s_{St} und berechnet daraus den Leitwert $\psi(s_{St})$ auf Basis einer benutzerdefinierten Leitkurve, die den Verlauf des Helixwinkels α über der axialen Position des Verdichterrads beschreibt. Die durch diese elektronische Kurvenscheibe an die Stößelposition s_{St} gekoppelten Leitwerte $\psi(s_{St})$ werden in einem geschlossenen Regelkreis durch den Servomotor in die gewünschte Bewegung der Drehachse umgesetzt. Durch dieses Steuerungssystem gelang es, den Einfluss von Rückhubgeschwindigkeitsänderungen auf das resultierende Helixprofil zu kompensieren.

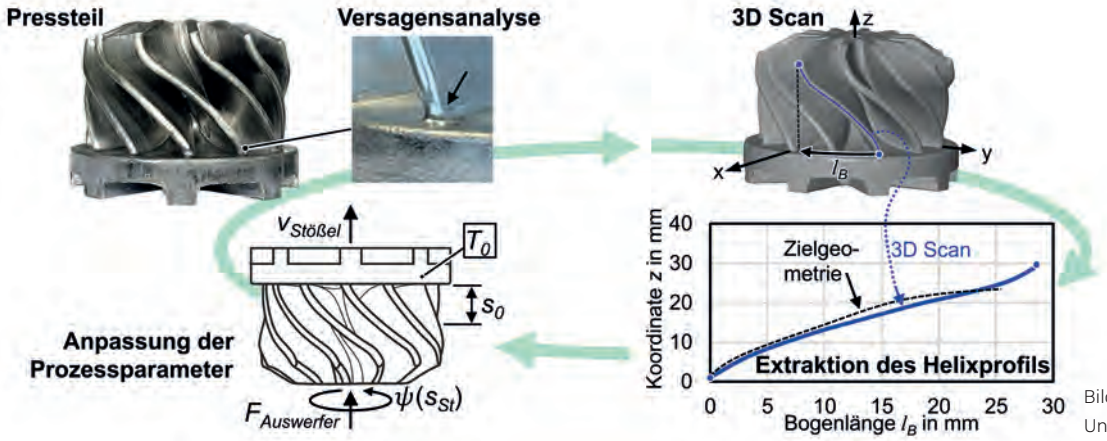


Bild 4: Ablauf der experimentellen Untersuchungen

Stranggepresste Stangenabschnitte aus EN AW-6082 dienten als Rohteile für die experimentellen Untersuchungen und wurden auf eine Temperatur $T = 300$ °C vorgewärmt. Die Rohteilzufuhr und die Entnahme der Pressteile erfolgten manuell. Die Untersuchungen umfassten Einzelhübe und eine Kleinserie mit zirka 60 Bauteilen, um mögliche Anlaufeffekte ausgehend vom ungewärmten Werkzeug nachvollziehen zu können. Die Taktzeit lag bei 30 Sekunden.

Bild 4 zeigt den prinzipiellen Ablauf der experimentellen Untersuchungen. Ausgehend von einem Pressteil wurde zunächst eine optische Analyse der versagenskritischen Wurzel der Formelemente am Übergang zum zylinderförmigen Bauteilbereich durchgeführt. Anschließend kamen 3D-Scans der gepressten Bauteile zum Einsatz, um die tatsächlich erzeugten Helixprofile zu extrahieren. Hierzu wurden die Bauteile zunächst gereinigt, in einer Dreheinrichtung aufgenommen und anschließend mit einem System des Typs GOM Atos dreidimensional erfasst. Die Datenauswertung erfolgte durch Extraktion von Endpunkten der Formelemente in unterschiedlichen z-Schnittebenen. Mithilfe der extrahierten Punktkoordinaten wurden die jeweiligen Inkremente der Bogenlänge l_B berechnet. Daraus ergab sich das in Bild 4 beispielhaft dargestellte Helixprofil als Abwicklung. Auf Basis der Abweichung zur Zielgeometrie wurde eine Anpassung der kinematischen Prozessparameter vorgenommen und der Prozess erneut durchgeführt.

ANALYSE DES HELIXPROFILVERLAUFS

Bild 5 zeigt Hüllkurven der Verläufe von Helixprofil und Helixwinkel einer Versuchsreihe mit 60 Bauteilen als Abwicklung über der Bogenlänge l_B. Die Streuung der über diese Versuchsreihe hinweg erfassten Helixprofile (Koordinate z über Bogenlänge l_B) ist als grau hinterlegte Fläche dargestellt. Die messtechnisch erfassten z-Koordinaten zeigten über die gesamte Bogenlänge hinweg eine Streubreite von maximal 1 Millimeter. Demnach kompensierte die mittels elektronischer Kurvenscheibe gekoppelte Überlagerung aus Dreh- und Axialbewegung instationäre Anlaufeffekte bedingt durch die steigende Werkzeugtemperatur.

In Bild 5 ist weiterhin eine beispielhafte Schnittansicht der hergestellten Vorform einer Schaufel mit innerhalb liegender zerspanter Endgeometrie dargestellt. Die für erste Prozessuntersuchungen eben ausgeführten Formelemente wiesen naturgemäß ein Zerspanungsaufmaß gegenüber der Endgeometrie auf. Dieses Aufmaß erlaubte zusätzlich zur prozessbedingten Streuung des Helixprofils ein Toleranzband, welches in Bild 5 als grüne Fläche dargestellt ist. Demnach lag die geometrische Streuung in einem zulässigen Bereich. Der Helixwinkelverlauf zeigte im Übergang zum zylindrischen Flanschbereich der Komponente (0 mm < l_B < 5 mm) zunächst relativ hohe Werte auf (40 ° < α < 55 °). Gründe dafür lagen einerseits in der dort lokal erhöhten Steifigkeit aufgrund des Übergangsradius und andererseits in dem in Bild 1 dargestellten Abhebeweg s_0, der prozessbedingt vor Initiierung der Verdrehbewegung realisiert wurde. Die in diesem Bereich stattfindende freie Biegung der Formelemente wurde demnach vorwiegend durch deren Steifigkeitseigenschaften definiert. Im Zentralbereich des Verdichterrads (5 mm < l_B < 25 mm) wies der Helixwinkel mit steigender Bogenlänge l_B gemäß der strömungstechnischen Vorgaben abnehmende Werte im Bereich 30 ° < α < 40 ° auf. Im oberen Bereich des Verdichterrads l_B > 25 mm nahm der Helixwinkel bis zu α = 60 ° zu. Dieser Bereich stellt die technologisch notwendige Kontaktfläche zwischen Matrize und Werkstück für die Einleitung des Drehmoments dar und wird bei der spanenden Nachbearbeitung entfernt.

Insgesamt zeigten sich folgende Parameter als besonders relevant für die Ermittlung der Prozessgrenzen, die sich vorwiegend aus der Rissinitiierung im Übergang der Formelemente in den flanschförmigen Bauteilbereich und aus dem zu erzielenden Helixprofil ergaben: Abhebeweg s_0, Gesamtdrehwinkel ψ, Ge-

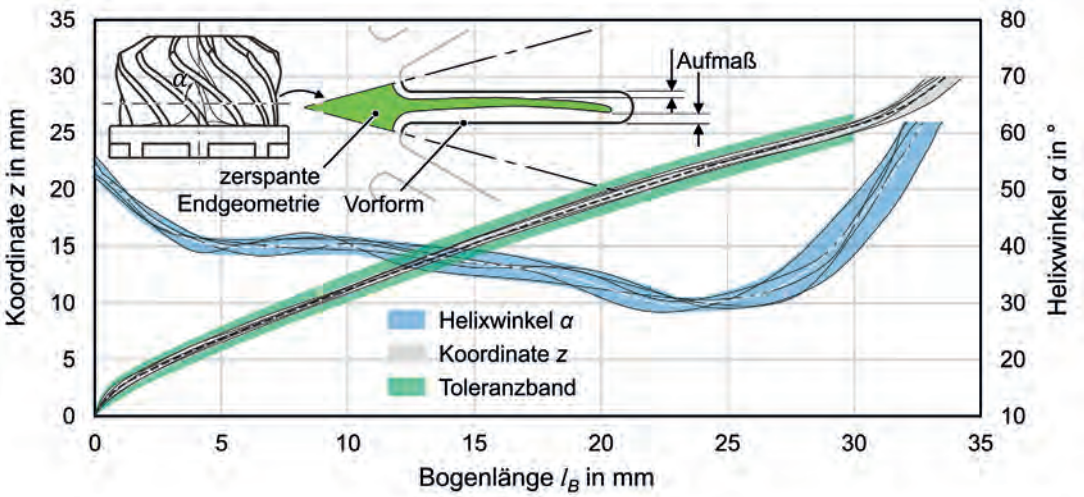


Bild 5: Hüllkurven von Helixprofil und Helixwinkel α während einer Anlaufphase mit 60 Bauteilen, Bilder: Autoren

genkraft des Auswerfers $F_{Auswerfer}$ sowie die Rohteiltemperatur T_0 und die dynamikbestimmende maximale Beschleunigung des Antriebs.

FAZIT

In diesem Projekt wurde eine neuartige Prozesstechnik zur Herstellung von helixförmigen Aluminiumbauteilen mit geringer Steigung und radial weit auskragenden Schaufeln entwickelt und erfolgreich erprobt. Hierzu wurden die maßgebenden Prozessparameter identifiziert und auf dieser Basis eine Methodik entwickelt, um den Verlauf des Helixsteigungswinkels einem strömungstechnisch idealen Profil anzunähern. Derart near-net- shape umgeformte Verdichterräder erfordern nach der Umformung lediglich einen Fertigschlichtprozess, um schließlich die Endgeometrie der einzelnen Schaufeln mit nur geringem Zerspanungsvolumen zu erzeugen. Dadurch wird eine deutliche Reduktion des CO_2-Fußabdrucks der gesamten Prozesskette erreicht. Am Institut für Umformtechnik wurde ein weiterführendes Forschungsprojekt platziert, in dem künftig die Herstellung derartiger Verdichterräder in modernen Prozessketten untersucht wird.

[1] Kiener, C.; Merklein, M.: 2020, Research of adapted tool design in cold forging of gears. International Journal of Material Forming 13, 6, S. 873 – 883

[2] Choi, J.; Cho, H.; Kwon, H.: 1994, A new extrusion process for helical-gears: Experimental study. Journal of Materials Processing Technology 46, S. 35 – 53

[3] Keppler-Ott, T.: 2002. Optimierung des Querfließpressens schrägverzahnter Stirnräder, Dissertation, Universität Stuttgart

[4] Missal, N.; Liewald, M.; Felde, A.; et al., 2019, Production of piston pin having a new helical inner profile by cold metal forming. Advances in Production Research, S. 468 – 476.

[5] Bulzak, T.; Tomczak, J.; Pater, Z.: 2014, Method for producing twist drills by extrusion using a three-slide forging press. Key Engineering Materials, S. 129 – 135.

Das Projekt „*HeliForm* – Entwicklung einer neuartigen, CO_2- sowie rohstoffeinsparenden Umformtechnik zur Herstellung von helixförmig angeordneten Formelementen mittels überlagerter Verdrehbewegung während des Ausstoßvorgangs im Fließpressen" wurde über die AiF Projekt GmbH im Rahmen des Programms Zentrale Innovation Mittelstand (ZIM) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Förderkennzeichen KK5079806HD1 gefördert. Die Autoren danken dem BMWK und der AiF Projekt GmbH für die Förderung.

Gefördert durch:

ZIM Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages