

Neuere Entwicklungen zur Herstellung von Schraubenrotoren mittels innovativer Umformverfahren

Dipl.-Ing. N. Ben Khalifa¹, Dipl.-Ing. J. Hauser², Prof. Dr.-Ing. A. E. Tekkaya¹, Prof Dr.-Ing. A. Brümmer²

¹Institut für Umformtechnik und Leichtbau, TU Dortmund

²Fachgebiet für Fluidtechnik, TU Dortmund

Kurzfassung

In diesem Paper werden zwei Umformverfahren zur Herstellung von Schraubenrotoren vorgestellt: Das Tordieren beim Strangpressen sowie das konventionelle Tordieren. Die Ergebnisse basieren auf experimentellen und numerischen Untersuchungen. Dabei werden die aktuellen Werkzeugentwicklungen, erreichbaren Steigungswinkel und die Konturgenauigkeit dargestellt und diskutiert. Weiterhin werden die Verfahrenscharakteristika verglichen und die damit verbundenen Grenzen hinsichtlich der Fertigungsgeometrie aufgezeigt. Die erzeugten Profilgeometrien und Steigungswinkel fließen anschließend in die Thermodynamiksimulation ein, um den Wirkungsgrad der hergestellten Profile zu analysieren.

1. Einleitung

Der Einsatz von Schraubenrotoren in Verdrängermaschinen sowie im Bereich der Versorgung stationärer und mobiler Brennstoffzellen gewinnt zunehmend industrielles Interesse. Diese neuartigen Antriebstechniken bringen mehrere Vorteile mit sich: Kompaktheit, Gewichtsreduzierung und zeitgleich höhere Leistungsdichte [1, 2]. Diesen Vorteilen stehen allerdings die hohen Fertigungskosten und der Fertigungsaufwand gegenüber. Zur Herstellung derartiger Schraubenrotoren wird in der Regel zunächst eine Vorform gegossen, die anschließend durch Fräsen und Schleifen auf Endmaß gebracht oder aber aus dem Vollmaterial komplett spanend hergestellt wird. Diese aufwändige Fertigungsart ist mit einem hohen Materialausschuss sowie langer Fertigungszeit verbunden, was den Einsatz dieser Maschinen in Großserie noch erschwert, sodass die industrielle Anwendung von Schraubenrotoren, insbesondere im Automobilbau, noch stark begrenzt ist.

Um einen serienmäßigen Einsatz der Schraubenrotoren im Automobilbau zu ermöglichen, müssen kostengünstige Alternativverfahren entwickelt und qualifiziert werden. Für diese Zielsetzung bietet eine umformtechnische Fertigung derartiger Bauteile mit ihrer breiten Palette an Verfahren aufgrund der hohen Flexibilität und des geringen Materialausschusses eine interessante und durchaus wirtschaftliche Alternative. Die größte Herausforderung stellen hierbei die einzuhaltenden Toleranzen. Ziel eines aktuellen, von der DFG geförderten Kooperationsprojektes des Instituts für Umformtechnik und Leichtbau und des Fachgebiets für Fluidtechnik der Technischen Universität Dortmund ist es daher, die Wechselwirkungen zwischen umformenden Verfahren und Maschineneigenschaften zu untersuchen und zu optimieren.

2. Untersuchte Umformverfahren

Zur umformenden Fertigung von schraubenförmigen Bauteilen sind in den letzten Jahren unterschiedliche Umformverfahren untersucht worden. Bei der Firma ASEA beispielsweise wurden mit dem Verfahren des hydrostatischen Strangpressens Stangen mit Schrägverzahnung aus Einsatzstahl gefertigt [3]. Die Firma Hydro stellt ebenfalls spiralförmige Schraubenrotoren aus Aluminium durch Strangpressen her. Im Bereich des Kaltfließpressens sind Untersuchungen zur Herstellung von schrägverzahnten Zahnrädern durchgeführt worden [4, 5]. Diese genannten Verfahren zeichnen sich durch die Anwendung von Pressmatrizen mit innerer Verdrehung aus. Bei diesen genannten Arbeiten handelt es sich hauptsächlich um Bilder von gefertigten Bauteilen. Eine systematische Untersuchung und Erforschung der angewandten Verfahren findet sich in der Literatur nur stark begrenzt wieder. Weiterhin könnte für diese Zielsetzung das konventionelle Tordieren stranggepresster Aluminium-Profile eine weitere Alternative zur Herstellung von schraubenförmigen Profilen darstellen. Dieses Verfahren wurde bislang eher zur Herstellung von beispielsweise Kurbelwellen oder Schiffsschrauben angewandt [6]. Im Rahmen des Forschungsprojektes wird die Eignung der genannten Verfahren „Internes Tordieren beim Strangpressen“ sowie das „Kaltverdrehen“ zur Herstellung von Schraubenrotoren untersucht.

3. Internes Tordieren beim Strangpressen (Helical Profile Extrusion HPE)

Die Vorteile des internen Tordierens beim Strangpressen liegen vor allem in einer möglichst hohen erzielbaren Oberflächengüte sowie einer konstanten Steigung, da die Geometrie unmittelbar von der Strangpressmatrize vorgegeben ist (**Abbildung 1**). Wie bereits erwähnt, basiert dieses Verfahrensprinzip auf dem Fließpressen von kleinen Bauteilen mit Schrägverzahnung. Eine Übertragung auf das Strangpressen wurde bisher nicht erforscht.

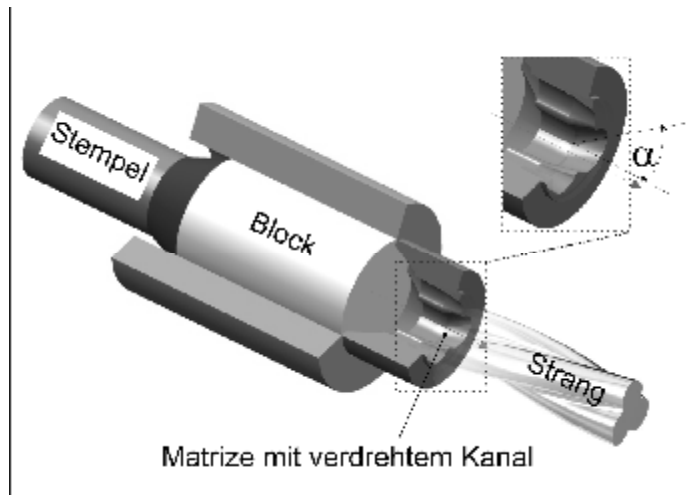


Abbildung 1: Verfahrensprinzip Internes Tordieren beim Strangpressen [7]

Hierbei war die Herausforderung ein derartiges Werkzeugkonzept zu entwickeln, bei dem eine Verdrehung im Inneren des Presskanals aufgebracht werden soll. Im Stand der Technik konnten bislang auch zu dieser Verfahrensvariante keine nennenswerten Informationen gefunden werden. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde am IUL ein Konzept zur Konstruktion und zur Fertigung einer Strangpressmatrize, die hinsichtlich des Steigungswinkels möglichst flexibel sein soll, entwickelt. Aus dieser Vorgabe wurde eine Matrize konstruiert, die in drei Elemente unterteilt wurde (**Abbildung 2a**).

Abbildung 2: Segmentierte Matrize mit Innenverdrehung und Beispiel eines damit gepressten Profils

Die ersten Pressungen sind erfolgreich durchgeführt worden. Der gepresste Aluminium-Block ist als tordiertes Profil aus der Matrize ausgetreten. Die Oberflächengüte entspricht ebenfalls der üblichen Qualität von stranggepressten Profilen (**Abbildung 2b**). Allerdings hat

sich der Querschnitt am Austritt deutlich verändert. Die Zahnbreite hat sich verringert und der Konturverlauf im Fußkreisbereich ist wesentlich flacher geworden. Es wird vermutet, dass der Werkstoff durch die Verdrehung in der Matrize ungleich schnell fließt, was zu einer Verformung führen könnte. Darüber hinaus ist der am Profil erzielte Steigungswinkel (ca. 20°) viel kleiner als der in der Matrize (Sollwinkel 90°). Um einen hohen Wirkungsgrad des Schraubenladers zu erzielen, sollte ein möglichst großer Steigungswinkel angestrebt werden. Aus diesem Grund wurde noch eine dritte Matrize mit einem Steigungswinkel von 40° bezogen auf 100mm gefertigt. Hier konnte der Steigungswinkel zwar deutlich erhöht werden, allerdings hat sich die Querschnittsgeometrie auch sehr deutlich verändert, so dass die Profilkontur mit der Sollgeometrie nicht mehr vergleichbar ist (**Abbildung 3**).

Abbildung 3: Soll-Ist Vergleich der Profilkontur nach dem Strangpressen mit verschiedenen Matrizen

Um die Winkel- sowie Querschnittsänderungen zu analysieren, wurden erste numerische Simulationsmodelle für das Strangpressen mit tordierter Matrize mittels des Simulationsprogramms DEFORM aufgebaut (**Abbildung 4**). Die Simulationsergebnisse zeigen die gleichen Tendenzen wie bei den experimentellen Untersuchungen. Auch hier ist der erreichte Steigungswinkel am Profil viel geringer als in der Matrize vorgegeben. Diese Winkeländerung tritt sofort bei Matrizenaustritt auf. Die Gründe hierfür sind in der Geschwindigkeitsverteilung am Matrizeneintritt zu finden. Der Werkstoff fließt ungleichmäßig schnell und die Zahnflanke mit dem schnelleren Werkstofffluss versucht dem von der Matrize vorgegebenen Winkel entgegenzuwirken. Hinsichtlich des Querschnittes ist die Geometrie am Fußkreis, ebenfalls flacher geworden, als von der Matrize vorgegeben. Auch hier ist die Ursache in der unterschiedlichen Werkstoffflussgeschwindigkeit am Matrizenaustritt zu

finden, denn aufgrund der Verdrehung entsteht eine tote Zone in der Matrize, in der kein Werkstoff nachfließen kann. Diese führt zur Verkleinerung der Querschnittsgeometrie.

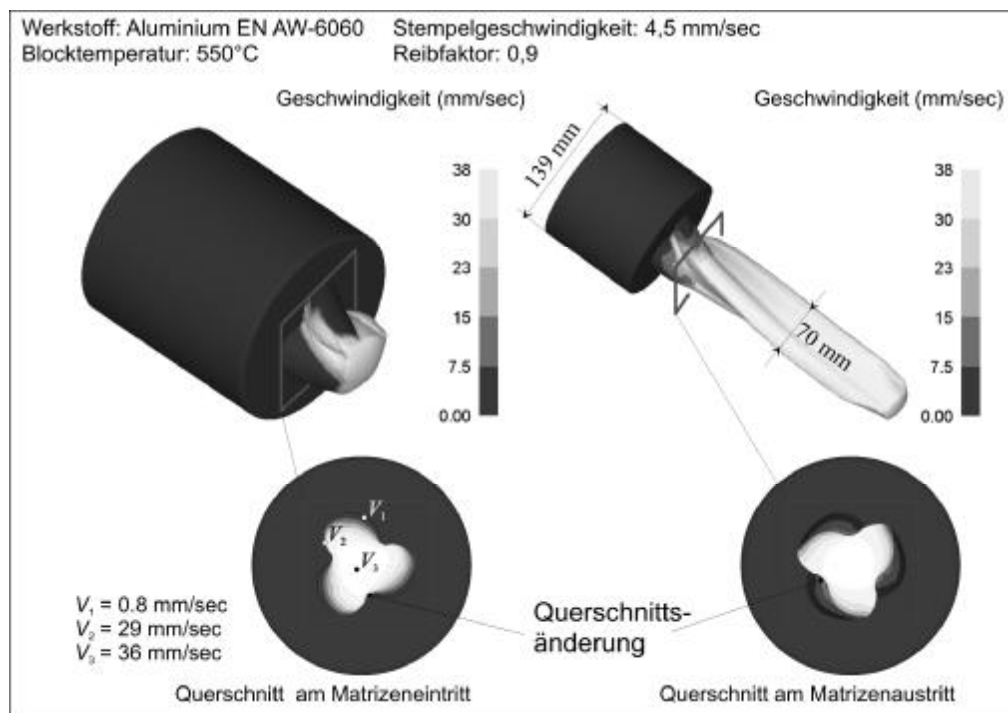


Abbildung 4: Numerische Betrachtung des Werkstoffflusses beim Tordieren beim Strangpressen

Es wurden weitere numerische Untersuchungen mit Variation der Reibung in der Matrize durchgeführt. Hierbei bewegte sich der Reibwert in der Matrize zwischen $m = 0,9$, wie es im Strangpressen von Aluminium üblich ist, und reibungsfrei ($m = 0$) (**Abbildung 5**). Es hat sich gezeigt, dass die Reibung einen signifikanten Einfluss auf die erreichbaren Konturgenauigkeiten und insbesondere auf die erreichbaren Steigungswinkel hat. Je niedriger der Reibwert ist, desto höher ist der Steigungswinkel am Profil. Das lässt sich dadurch erklären, dass der Werkstoff die Matrize komplett füllt und auch ungehindert gleichmäßig fließt. Beim Strangpressen ist es allerdings heutzutage noch nicht möglich, durch geeignete Beschichtungssysteme die Reibung in der Matrize deutlich zu reduzieren. Aus diesem Grund sollte der Werkstofffluss durch konstruktive Änderungen an der Matrize optimiert werden.

Abbildung 5: Einfluss der Reibung in der Matrize auf den erzielbaren Steigungswinkel

Optimierung des Werkstoffflusses

Wie eben geschildert, sind aktuelle Beschichtungssysteme nicht in der Lage, die Reibung in der Strangpressmatrize deutlich zu reduzieren. Die Modifikation der Führungsflächenlänge und der Werkzeuggeometrie geschieht mithilfe von CAD Programmen und FEM Simulation. Ein erster Schritt in der Werkzeuganpassung ist es, den Bereich der toten Zone auszuschneiden, damit die Profilkontur besser wiedergegeben werden kann. Dieses neue Konzept wurde simuliert und es zeigte sich ein verbesserter Werkstofffluss am Matrizenaustritt. Die Abweichung der Profilkontur ist deutlich verringert worden, allerdings war der berechnete Steigungswinkel sehr gering. Aus diesem Grund wurde die Länge der Führungsflächen an beiden Zahnflanken so angepasst, dass der Werkstoff gleichermaßen gebremst wird. Weiterhin wurde bei dem neuen Werkzeugkonzept eine Verdrehung des Werkstoffflusses zusätzlich in der Vorkammer vorgesehen, um den Steigungswinkel zu erhöhen. Diese Werkzeuggeometrie wurde anschließend gefertigt und experimentell erprobt (**Abbildung 6a**). Das Ergebnis der experimentellen Untersuchung zeigt **Abbildung 6b**.



Abbildung 6: a) optimierte Strangpressmatrize, b) Erhöhung der Konturgenauigkeit durch Optimierung des Werkstoffflusses.

Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Profilkontur der Sollkontur entspricht. Der bei diesem Versuch erzielte Steigungswinkel beträgt ca. $30,5^\circ$. Der Steigungswinkel konnte aufgrund des großen Flächenträgheitsmomentes trotz größeren Winkels in der Matrize nicht signifikant gesteigert werden, denn beim Strangpressen fließt der Werkstoff in der Mitte wesentlich schneller als an den Randzonen. Somit kann ein großer Anteil des Werkstoffes nicht wesentlich umgelenkt werden. Als Fazit zu diesen Untersuchungen kann festgestellt werden, dass die Profilgeometrie, insbesondere das Flächenträgheitsmoment und die Zahnbreite einen wesentlichen Einfluss auf die maximal erreichbaren Steigungswinkel haben. Das bedeutet, je kleiner der Rotorquerschnitt ist und je schmalere die Rotorzähne sind, desto größer ist der maximal erzielbare Steigungswinkel. Eine andere Möglichkeit, den Steigungswinkel zu erhöhen, ohne die Geometrie anzupassen, stellt das konventionelle Tordieren dar, was im Folgenden vorgestellt wird.

4. Konventionelles Tordieren

Beim konventionellen Tordieren wird auf der einen Seite des Profils eine Einspannvorrichtung und auf der anderen Seite ein Drehantrieb vorgesehen, um die Torsion hervorzurufen (**Abbildung 7**). Gegenstand der Prozessanalyse ist insbesondere die Ermittlung der zu erzielenden Geometrieeigenschaften. Von Bedeutung sind hierbei die Genauigkeit der Kontur sowie des Steigungswinkels über der gesamten Profillänge. Diese sollen numerisch mithilfe der Methode der Finiten Elemente ermittelt werden.

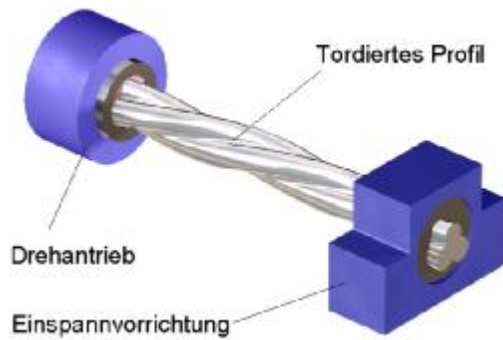


Abbildung 7: Verfahrensprinzip des konventionellen Tordierens

Da in den Schraubenmaschinen immer ein Rotorpaar eingesetzt wird, ist es erforderlich, die Nebenrotoren ebenfalls auf den Steigungswinkelfehler und die Konturabweichung zu untersuchen. Die Gesamtabweichung wird aus der Summe der Einzelabweichung ermittelt. Es wurden verschiedene Profilgeometrien zunächst mithilfe des FE-Programms Superform untersucht (**Abbildung 8**).

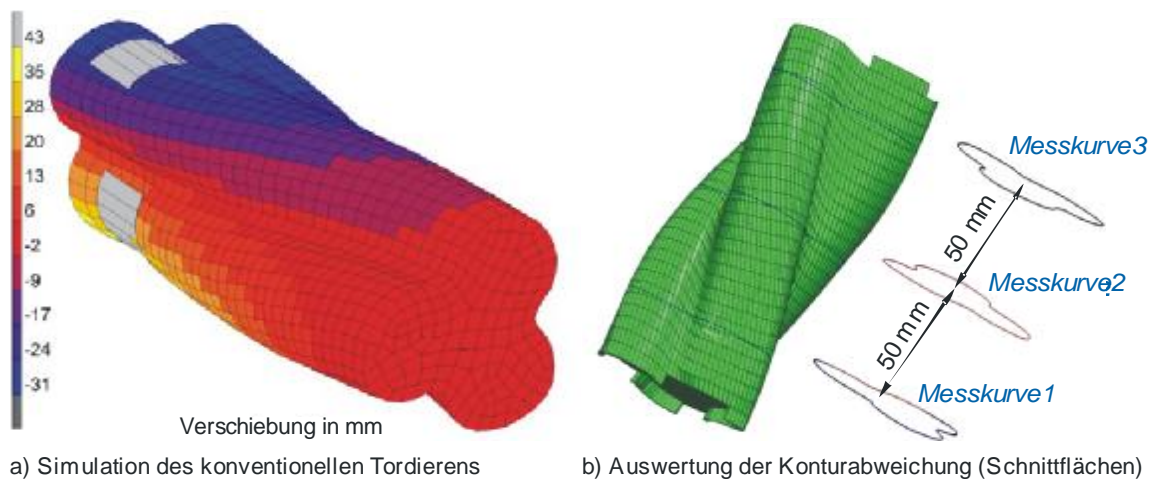
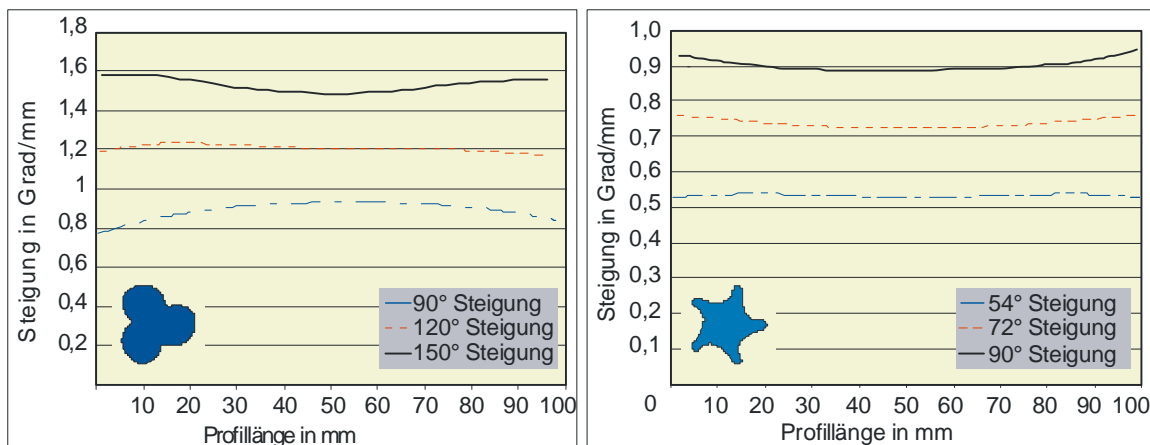


Abbildung 8: Theoretische Untersuchung des konventionellen Tordierens mithilfe der FEM

Dabei wurde bei den vom Fachgebiet für Fluidtechnik gelieferten Rotorpaaren jeweils ein geometrischer Parameter variiert, um seinen Einfluss auf die Konturabweichung sowie auf den Steigungswinkelfehler zu untersuchen. Diese Vorgehensweise wurde ausgewählt, um den Zusammenhang zwischen den wichtigsten Geometrieparametern und den Verfahrenscharakteristiken des konventionellen Tordierens zu beschreiben, damit im Anschluss eine für dieses Verfahren geeignete Geometrieoptimierung realisiert werden kann.

Bei den untersuchten Rotorpaaren wurden der Konturverlauf sowie die Zahnbreite variiert bei konstant bleibendem Fuß-, Kopfkreisdurchmesser sowie Werkstoff (EN AW-6060), um den Einfluss der letztgenannten Parameter auf die Bauteilqualität zu minimieren.

Bezüglich der Konturabweichung hat sich die Erwartung bestätigt, dass bei flacherem Konturverlauf im Fußkreisbereich eine geringere Abweichung der Kontur entsteht, und dass die Abweichung bei größer werdendem Steigungswinkel zunimmt [Tabelle1]. Bei der Auswertung des Steigungswinkelverlaufes über die Bauteillänge wurde die geringste Abweichung bei einem Sollwinkel von ca. 120 ° beim Hauptrotor und bei 72 ° beim Nebenrotor festgestellt (Abbildung 9). Dieser Winkel der 5-zähligen Nebenrotoren entspricht genau dem erforderlichen Steigungswinkel zur Paarung mit einem Hauptrotor mit dem 120°-Winkel.



a) Steigungswinkelverlauf beim Hauptrotor

b) Steigungswinkelverlauf beim Nebenrotor

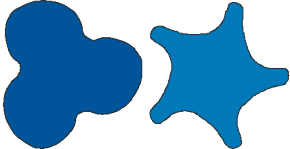
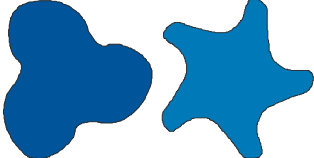
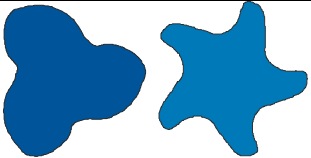
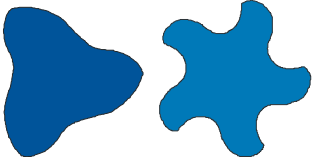
Abbildung 9: Steigungswinkelverlauf über die Bauteillänge beim Haupt- und Nebenrotor am Beispiel des Ausgangsprofils (Werkstoff: EN AW-6060)

Der Steigungsverlauf hängt vom erzielten Verdrehwinkel stark ab (Abbildung 9). Die Verläufe bei einem Sollwinkel von 90° im Hauptrotor und 54° im Nebenrotor sind ähnlich. Beim Überschreiten des Sollwinkels 120° beim Hauptrotor und 72° beim Nebenrotor nimmt der Verlauf eine gespiegelte Form vom ersten Verlauf an. Der mittlere Verlauf zeigt lineare Tendenzen, was auf eine geringe Abweichung des Steigungsfehlers schließen lässt. Die Gründe für die unterschiedlichen Verläufe liegen in dem Einfluss der Einspannung.

Die Auswertung der Konturabweichung und des Steigungsfehlers für die vier untersuchten Profile sind in nachfolgender Tabelle zusammengefasst. Die ermittelten Abweichungen sind bei den vier Profilen unterschiedlich, was auf einen Einfluss des Konturverlaufes auf die Konturabweichung hindeutet. Diese Daten sollen bei den thermodynamischen Simulationen

mitberücksichtigt werden, um eine Auswertung der Rotorpaare sowohl aus umformtechnischer als auch aus thermodynamischer Sicht durchzuführen.

Tabelle 1: Simulationsergebnisse des konventionellen Tordierens für 4 ausgewählte Rotorpaare

Profil	Sollwinkel		Konturabweichung		Steigungsfehler	
	° / 100mm		mm		° / mm	
Rotortyp	HR	NR	HR	NR	HR	NR
 Ausgangsprofil	90	54	0,32	0,10	0,037	0,003
	120	72	0,5	0,17	0,014	0,011
	150	90	0,9	0,24	0,030	0,014
 Profil 1	90	54	0,281	0,11	0,025	0,006
	120	72	0,46	0,18	0,008	0,008
	150	90	0,63	0,27	0,039	0,017
 Profil 2	90	54	0,28	0,12	0,032	0,009
	120	72	0,42	0,19	0,010	0,006
	150	90	0,57	0,28	0,039	0,017
 Profil 3	90	54	0,25	0,15	0,012	0,023
	120	72	0,37	0,23	0,020	0,004
	150	90	0,51	0,31	0,060	0,020

Zur Verifikation der Simulationsergebnisse wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Hierzu wurde am Institut für Umformtechnik und Leichtbau eine pc-gesteuerte Verdrehvorrichtung entwickelt und gefertigt. Mit dieser Vorrichtung ist es möglich, dass Profile mit einer Länge von bis zu 550 mm verdreht werden. Das maximale Drehmoment beträgt bei dieser Maschine ca. 3000 Nm (**Abbildung10**).

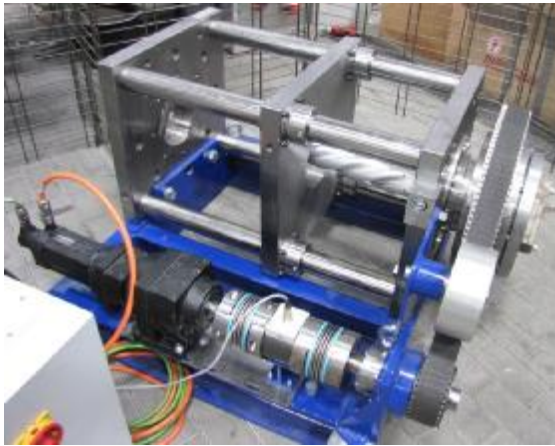


Abbildung 10: Entwickelte Verdrehvorrichtung

Bei den experimentellen Untersuchungen wurden stranggepresste Aluminiumhalbzeuge (Werkstoff: EN AW-6060) bis zu einem Winkel von etwa 160° tordiert. Die durchgeführten Versuche zeigten die Entstehung einer rauen Oberfläche bei den Bauteilen (Orangenhautbildung), die aufgrund eines dreiachsigen Zugspannungszustandes an der Oberfläche hervorgerufen wurde. Neben dem Hauptrotor wurde auch der Nebenrotor stranggepresst und anschließend tordiert (**Abbildung 11a**). Bei diesen Untersuchungen wurden Profile mit verschiedenen Steigungswinkeln gefertigt und anschließend ausgemessen. Im nächsten Schritt wurden die Aluminiumrotoren mit Stahlwellen versehen (**Abbildung 11b**). Die Messdaten sowie die erzeugten Rotoren stellen die Grundlage für die Auswertung des Maschinenverhaltens im Betrieb dar. Dies ist Gegenstand der aktuell laufenden Untersuchungen am Fachgebiet für Fluidtechnik.

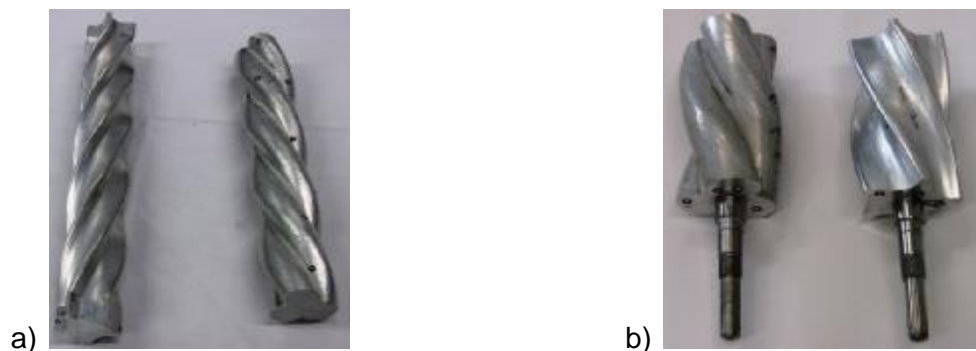


Abbildung 11: Hergestellte Rotoren mit Stahlwellen

Zusammenfassung und Ausblick

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Umformtechnik vergleichsweise kostengünstige, aber auch flexible Alternativen zur Herstellung derartiger Bauteile bietet. Dabei ermöglichen die ermittelten Toleranzen beim konventionellen Tordieren eine

geringfügige spanende Nachbearbeitung, um die Endgeometrie zu erzeugen, was auch eine Reduzierung der Fertigungskosten bedeutet. Beim internen Verfahren Tordieren beim Strangpressen konnte gezeigt werden, dass der erzielte Verdrehwinkel zwar noch gering ist, dafür konnte aber die Profilkontur deutlich verbessert werden. Im direkten Vergleich beider Verfahren kann gesagt werden, dass die Anforderungen an die Profilgeometrie gegensätzlich sind; beim Tordieren beim Strangpressen ist ein kleineres Profil mit schmalen Zähnen vorteilhaft. Beim konventionellen Tordieren dagegen sollte die Geometrie möglichst massiv sein und die Zähne möglichst flach sein. Eine Kombination beider Verfahren könnte die erreichten Grenzen hinsichtlich des Steigungswinkels deutlich erweitern.

Danksagung

Die Veröffentlichung basiert auf Forschungsarbeiten des Projektes TE508/3-3, das von der DFG gefördert wird.

Literatur:

- [1]: Helpertz, M.: Methode zur stochastischen Optimierung von Schraubenrotorprofilen. Dr.-Ing. Dissertation, Uni Dortmund, 2003.
- [2]: Temming, J.: Ein Beitrag zur Aufladung von Brennstoffzellen. Dr.-Ing. Dissertation, TU Dortmund, 2007.
- [3]: Schreiter G., „Hydrostatisches Strangpressen“, Strangpressen, zweite Auflage, Aluminium-Verlag, Düsseldorf, 2001.
- [4]: Keppler-Ott, T.: Optimierung des Querfließpressens schrägverzahnter Stirnräder. Dr.-Ing. Dissertation, Universität Stuttgart, 2002.
- [5]: Kondo k., Ohga K., “Precision Cold Die Forging of a Ring Gear by Divided Flow Method”. Int. Mach. Tools Manufact., Vol. 35, No. 8, 1995, S. 1005-1013.
- [6]: Neubauer, A.; Neumann, H.: Anwendungsfälle und Untersuchungen zum Formänderungszustand bei Warmtorsion. Fertigungstechnik und Betrieb, Berlin 36 (1986) 9, S. 554-557.
- [7]: Ben Khalifa N., Becker D., Schikorra M., Tekkaya A.E., “Recent Developments in the Manufacture of Complex Components by Influencing the Material Flow During Extrusion.” Recent Developments in the Manufacture of Complex Components by Influencing the Material Flow During Extrusion. Key Engineering Materials Vol. 367 (2008), S. 55-62.