

# Temconex® - Kontinuierliche Pulverextrusion: Verbessertes Verständnis mit Hilfe der numerischen Simulation

Michael Hilbinger, Claudia Stadelmann, Matthias List, Robert F. Singer  
Neue Materialien Fürth GmbH, Germany

## 1. Einleitung

### 1.1. Funktionsprinzip des Temconex®-Prozesses

Temconex® ist eine Marke der Neuen Materialien Fürth GmbH und steht für „temperaturgeregelte kontinuierliche Extrusion“. Die Temconex®-Technologie ist ein neues Herstellungsverfahren, mit dem Metallpulver verfestigt werden, d. h. Pulver wird zu einem länglichen und dichten Produkt wie Stab, Rohr oder Profil verarbeitet. In Abbildung 1 ist das Prinzip dargestellt [Sta 2018].

Hauptbestandteile des kontinuierlichen Strangpress-Prozesses von Temconex® sind ein rotierendes Rad mit einer Umfangsnut und ein stationärer Schuh mit der Extrusionsdüse. Der Schuh wird ständig mit kontrollierter Kraft gegen das rotierende Rad gedrückt. Um die Pulverextrusion durchzuführen, wird das Pulver in die Umfangsnut des rotierenden Rades eingeführt und anschließend durch Reibung in Richtung des Schuhs transportiert. Ein Widerlager, das in die Radnut passt, stoppt den Materialfluss und lenkt ihn mit einem Winkel von 90 ° um. Das Material wird dann gezwungen, in die Düsenkammer und durch die Düsenöffnung zu fließen.

Die fortgesetzte Raddrehung erzeugt Reibung und plastische Verformung in der Pulvermasse. Die freigesetzte Wärme führt zu einem starken Temperaturanstieg, womit typische Materialheißarbeitstemperaturen erreicht werden. Diskrete Pulverteilchen werden durch Scherung entlang der Grenzflächen unter hohem Druck und hoher Temperatur miteinander verschweißt. Das Ergebnis ist eine Kompaktierung des Pulvers zu einem vollständig dichten Feststoff.

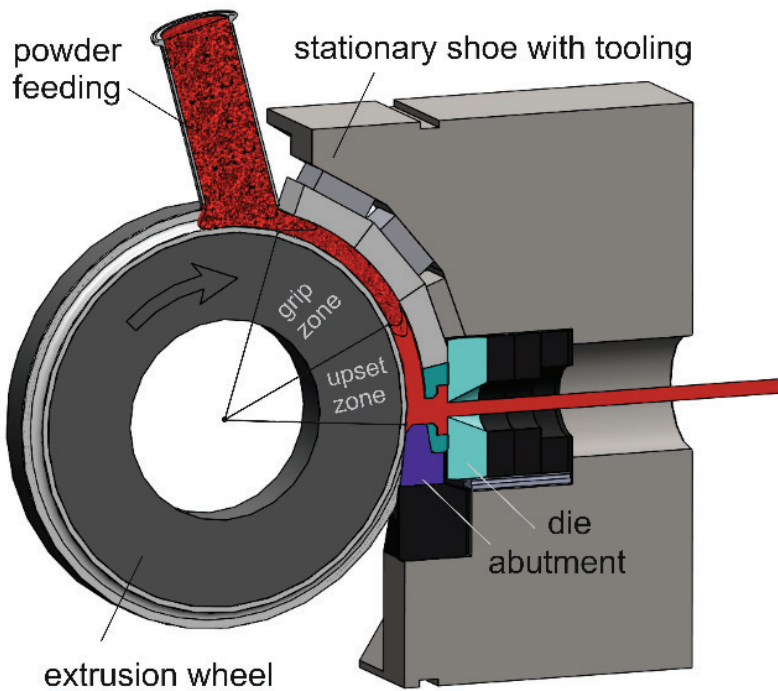


Fig. 1: Schematische Darstellung des Temconex®-Prozesses

Die zwischen den Pulverpartikeln eingeschlossenen Gase werden während der ersten Erhitzungs- und Konsolidierungsphasen in der Griff- und Stauchzone, in der die Gase noch zum Beschickungspunkt ablaufen können, herausgedrückt.

Die Temconex®-Technologie wurde von einem viel älteren Prozess abgeleitet, der Conform™-Technologie [Gre 1972]. Conform™ verwendet eine ähnliche Konfiguration, aber anstelle von Pulver wird ein Draht in die Maschine eingeführt. Die Forscher, die die Conform™-Technologie entwickelt haben, haben auch einige Vorarbeiten an Pulvern durchgeführt (Hun 1976, Par 1980, Eth 1984, Sla 1985), der Prozess erreichte jedoch keine kommerzielle Reife.

Als die Arbeiten zur kontinuierlichen Extrusion bei NMF im Jahr 2001 begannen (Sta 2009), wurde eine Prototypenanlage mit einer Antriebsleistung von 157 kW und einem Raddurchmesser von 300 mm installiert, siehe Abbildung 2.

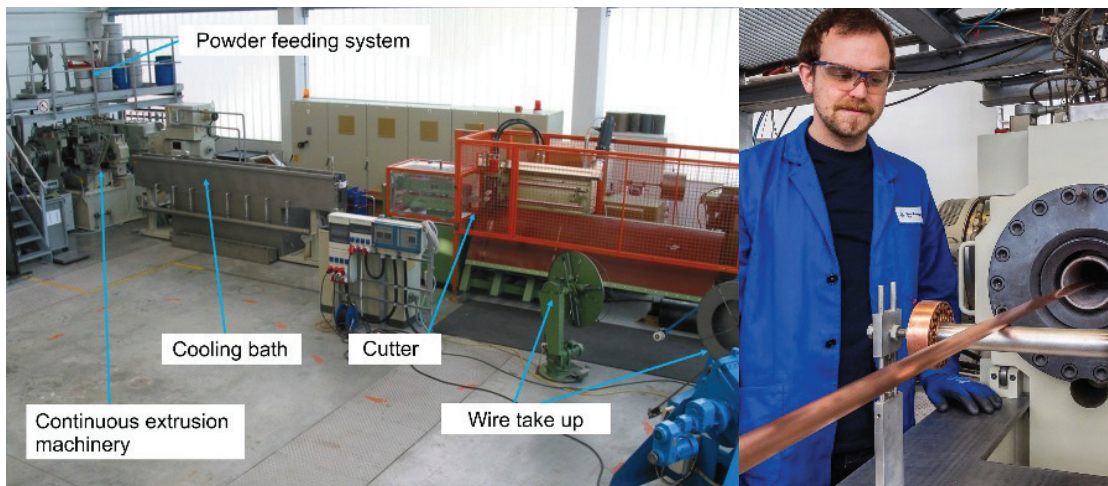


Abb. 2. Aufbau der Temconex®-Extrusionslinie (A). Kupferstab aus der Temconex®-Maschine (B).

Im Laufe der Jahre wurden eine Reihe von Verbesserungen an dem Prozess durchgeführt, wobei festgestellt wurde, dass eine sorgfältige Temperaturkontrolle von wesentlicher Bedeutung ist. Die Art und Weise, in der die Temperatur für Pulver geregelt werden muss, unterscheidet sich sehr stark von Draht als Ausgangsmaterial. Die zu ergreifenden Maßnahmen scheinen in erster Linie auch etwas kontraintuitiv zu sein. Beim Temconex®-Prozess muss der Zufuhrkanal nahe am Eingang gekühlt und nahe der Extrusionsöffnung erhitzt werden, da die Kühlung die Pulverfluidität verbessert und die Erwärmung den Extrusionsdruck senkt.

Das Temconex®-Verfahren wurde erfolgreich bei einer Vielzahl von Materialien angewendet, z. B. Legierungen auf Aluminium-, Kupfer-, Titan- und Silberbasis mit und ohne Dispersoiden, Partikel- oder Faserverstärkung. Es sollte jedoch beachtet werden, dass jedes Material eine individuelle Prozessgestaltung benötigt, die von der Materialfestigkeit, den Pulvereigenschaften und der Produktgeometrie abhängt.

## 1.2. Vorteile des Temconex®-Prozesses

Die Standardmethode zur Verfestigung von Pulvern ist die Extrusion, jedoch bietet Temconex® im Vergleich dazu Vorteile in Bezug auf Kosten und Qualität.

**Kosten.** Der Standardprozess der Extrusion ist aus mehreren Gründen ein sehr teures Verfahren. Ein nicht zu extrudierender Teil des Barrens in der Größenordnung von 10% verbleibt, weil er Oxide von der Barrenhaut enthält. Die Extrusion erfordert lange unproduktive Rüstzeiten, in denen der Barren oder der

Pressrest übertragen werden, in der die Maschine kalibriert wird usw. Bei der Standardpulverextrusion muss ein Pulverrohling durch Kaltpressen, Zerspanen, Entgasen usw. hergestellt werden. Die Temconex®-Extrusion ist weniger kostenintensiv, weil sie kontinuierlich ist, eine höhere Ausbeute liefert und keine Pulvervorbehandlung erfordert. Die Kostenvorteile können einen Faktor von zwei oder mehr erreichen.

**Qualität.** Typischerweise sind die mechanischen Eigenschaften nach der kontinuierlichen Pulverextrusion von Temconex® der Standardextrusion ähnlich. Es gibt jedoch Fälle, in denen die Qualität sogar verbessert wird. Ein Vorteil der Temconex® Extrusion ist die kürzere Temperaturbelastung. Wenn schnell erstarrte Pulver mit verbesserter, aber instabiler Mikrostruktur verwendet werden sollen, stellt dies einen wichtigen Nutzen dar.

## 2. Versuche

### 2.1. Versuchsaufbau

Für diese Studie wurden ECKA Aluminium GL Al99.7 Granulate mit einem Durchmesser im Bereich von 3 bis 8 mm als Ausgangsmaterial verwendet. Die Extrusionsversuche wurden auf einer Temconex®-Maschine, d. h. einer etwas modifizierten Conform™-Maschine C300H, hergestellt von Holton Crest Ltd., durchgeführt, die mit den notwendigen Pulverhandhabungsmerkmalen verstärkt wurde. Der Raddurchmesser beträgt 300 mm und die Umfangsnut hat eine Breite von 20 mm. Die Radgeschwindigkeit betrug 4 U/min. Der extrudierte Stab hatte einen Durchmesser von 12,5 mm.

### 2.2. Materialflussdaten

Um Eingabedaten für die numerischen Untersuchungen zur Verfügung zu stellen, wurden Heißkompressionstests an einer Gleeble® 3500 Hydraulikprüfmaschine durchgeführt. Zylinder mit einer Höhe von 13,5 mm und einem Durchmesser von 9 mm wurden aus Temconex®-Stangen hergestellt. Die Proben wurden mit 5 K/s auf die Testtemperatur erhitzt, 3 Minuten eingeweicht und dann unter konstanten axialen (echten) Dehnungsgeschwindigkeiten auf eine Dehnung von 0,6 gebracht. Die Tests wurden bei 20, 100, 250, 400 und 500°C durchgeführt, kombiniert mit Dehnraten von 0,01, 0,1, 1 und 5 s<sup>-1</sup>. Während die Kontrolle der

Dehnung und damit der Dehnungsrate durch einen axialen Dehnungsaufnehmer beeinflusst wird, erfolgt die Erfassung der Dehnung für die Fließkurven über einen transversalen Dehnungsmessstreifen.

Das Materialmodell nach Sheppard (She 1979) dient zur Schaffung von Strömungseingangsdaten für die numerische Simulation. Die Grundlage für das Sheppard-Modell ist die allgemeine Materialgleichung für die Warmumformung nach Sellars und Tegart (Sel 1966).

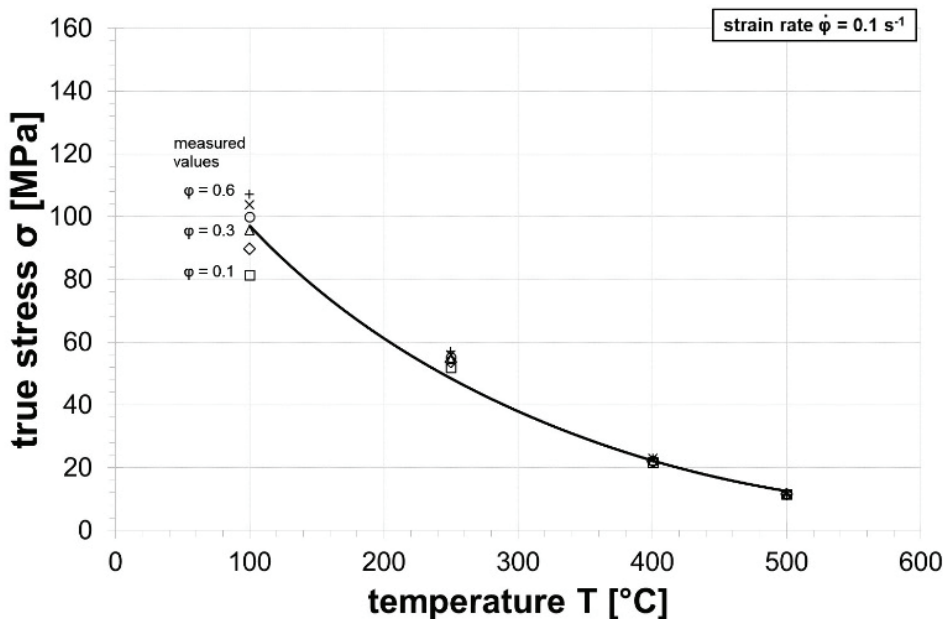


Abb. 3: Eine beispielhafte Spannungs-Dehnungs-Beziehung Für eine Dehnungsrate von  $0,1 \text{ s}^{-1}$ , bestimmt nach dem Materialmodell nach Sheppard.

Obwohl dieses Modell streng genommen für den Temperaturbereich der Warmumformbarkeit gültig ist, zeigt es eine gute Übereinstimmung mit den experimentell bestimmten Werten über  $100^\circ\text{C}$  (siehe Abbildung 3). Bei der Auswertung wird der elastische Anteil subtrahiert und eine konstante Dehnung von 0,3 angenommen.

### 3. Modellierung des Materialflusses

Die numerische Modellierung der Extrusion ist ein etabliertes Werkzeug, um das allgemeine Verständnis des Prozesses und des geometrischen Layouts von Komponenten zu fördern. Ein kurzer Überblick über angewandte Software und numerische Methoden wird in (Wil 2010) gegeben. Der konventionelle (aber nicht ausschließliche) Ansatz zur Simulation der Extrusion ist ein Lagrange-Ansatz. Im Hinblick auf den kontinuierlichen Prozess und die vergleichsweise



langen Durchlaufzeiten wird in der vorliegenden Arbeit die numerische Modellierung des Temconex®-Prozesses mit der CFD-Software Flow3D, einem Eulerschen System, durchgeführt. Eulersche Systeme sind im Hinblick auf die massive plastische Verformung günstig und ihre erfolgreiche Anwendung in der Modellierung wurde in (Lou2008, Bas 2008, Bre 2013) demonstriert.

Die Simulation deckt nur einen Teil des tatsächlichen Prozesses ab und ist hier auf die Stauchungszone und Extrusionszone beschränkt (siehe Abbildung 1). Die genaue Länge der Stauchungszone ist nicht bekannt und kann nur geschätzt werden. Die Begrenzung des Simulationsbereiches ergibt sich daraus, dass das Materialmodell auf den Warmumformbarkeitsbereich beschränkt ist. Darüber hinaus wird der Materialfluss in der Griffzone von der granularen Strömung dominiert (oder zumindest stark beeinflusst). Dies führt zu weiteren, von Partikelgröße und -form herrührenden Effekten, die nicht Teil des vorgestellten Modells sind.

Abbildung 4 zeigt den Strömungsbereich zusammen mit der Werkzeuggeometrie und Abbildung 5 zeigt die Randbedingungen, die sich aus denjenigen Prozessparametern ergeben, die im Extrusionsversuch angenommen wurden. Der Volumenstrom von  $1,25 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  wurde im Versuch gemessen. Die Fluiddomäne wird mit einer Netzgröße von 0,75 mm aufgelöst.

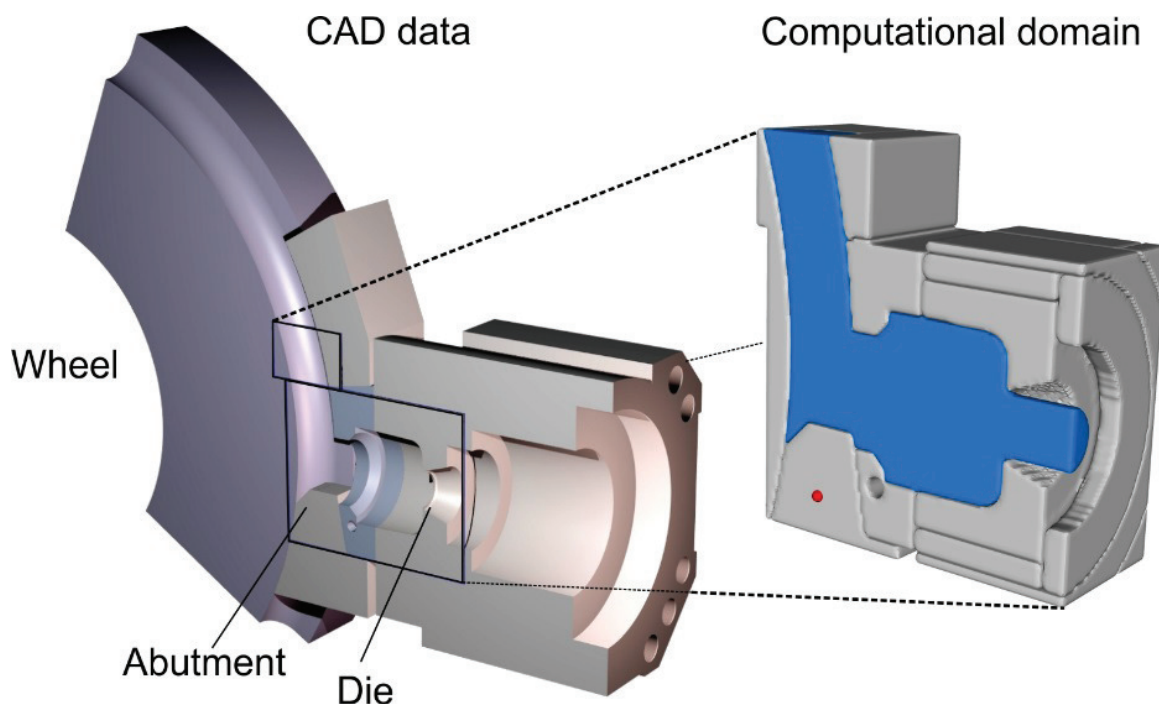


Abb. 4: Allgemeine Geometrie und Fluiddomäne

Am Einlass wird ein ungleichmäßiges Geschwindigkeitsprofil eingeführt, das aus der Raddrehung in der reinen Kanalströmung abgeleitet wurde. Die Raddrehung bei einer Drehzahl von 4,0 U/min zwingt das Material, sich mit der Oberfläche der Radnut zu bewegen. Am Auslass herrscht atmosphärischer Druck.

Es wird angenommen, dass die Grenzfläche zwischen dem Fluid und den umgebenden Komponenten über eine rutschfreie Grenzbedingung definiert ist. Eine Ausnahme stellt das extrudierte Material dar, das die Düse passiert hat. Dieses fließt frei, d. h. wird über eine Gleitgrenzbedingung definiert. Bei der Wärmeübertragung sorgt ein gleichmäßiger Wärmeübergangskoeffizient von 20 kW/(m²K) für nahezu ideale Bedingungen an der Grenzfläche.

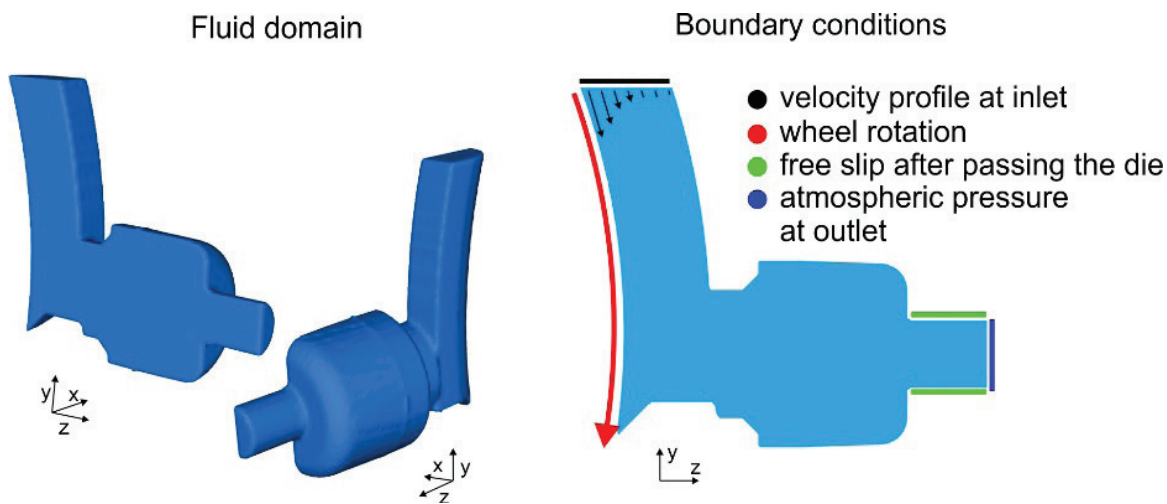


Abb. 5: Fluiddomäne und angewandte Randbedingungen

In Bezug auf das Material wird angenommen, dass es sich wie eine inkompressible Flüssigkeit verhält und isotrop ist. Wegen der großen plastischen Verformung, die bei Extrusionsprozessen beobachtet wird, wird die elastische Verformung vernachlässigt. Dies ist eine gültige Annahme nach [Sel 1972]. Das Material ist als nicht-Newtonsche Flüssigkeit definiert, die Viskosität ist abhängig von Temperatur und Dehnungsrate (oder Scherrate). Als ein wesentlicher Aspekt des Verfahrens sind die Fließbedingungen und damit die Viskosität des Materials a priori unbekannt. Die Bestimmung der (lokalen) Viskosität, die nicht nur eine Materialeigenschaft ist, sondern zusätzlich die lokalen Verformungsbedingungen widerspiegelt, ist Teil des iterativen Lösungsprozesses.

Da Plastizität eine Form von Strömung ist, erlaubt die Beziehung von Dehnungsrate und Spannung die Bestimmung einer Viskosität durch die folgende Gleichung:

$$\mu = \frac{1}{3} \cdot \frac{\bar{\sigma}}{\dot{\phi}}$$

mit  $\dot{\phi}$ , der effektiven Dehnungsrate und  $\bar{\sigma}$ , der effektiven (deviatorischen) Spannung. Der Begriff „effektiv“ berücksichtigt Werte in drei Dimensionen in inhomogenen Feldern und „deviatorisch“ bezieht sich auf die Tatsache, dass ein gleichmäßiger Druck keine Auswirkung auf die Verformung hat. Das Ersetzen der effektiven Spannung in dieser Gleichung durch die Spannungsformulierung aus der experimentellen Bestimmung ergibt eine Viskosität, die nur von Temperatur und Dehnungsrate abhängt. Diese zwei Größen werden iterativ während des gesamten Berechnungsverfahrens zu jedem Zeitschritt bestimmt, wobei Maßnahmen zur Sicherstellung der Konvergenz erforderlich sind. Die viskose Erwärmung des plastisch verformten Materials wird berücksichtigt.

## 4. Ergebnisse und Diskussion

Abbildung 6 zeigt die nach einer simulierten Verarbeitungszeit von 50 s erhaltenen Ergebnisse in Form von Druck-, Geschwindigkeits- und Dehnungsratenverteilungen in der Fluiddomäne. Die Druckspitzenwerte werden offenbar am Widerlager beobachtet, wo der Materialfluss umgelenkt wird. Dies stimmt mit der Tatsache überein, dass das Widerlager als das mechanisch am meisten beanspruchte Bauteil im Prozess angenommen wird. Die Geschwindigkeiten erreichen hohe Werte an der Schnittstelle zum Rad, wo die Materialbewegung beginnt. Beim Eintritt in die Druckkammer zeigt das Material eine leichte Tendenz, sich vorzugsweise am Boden des Kanals zu bewegen.



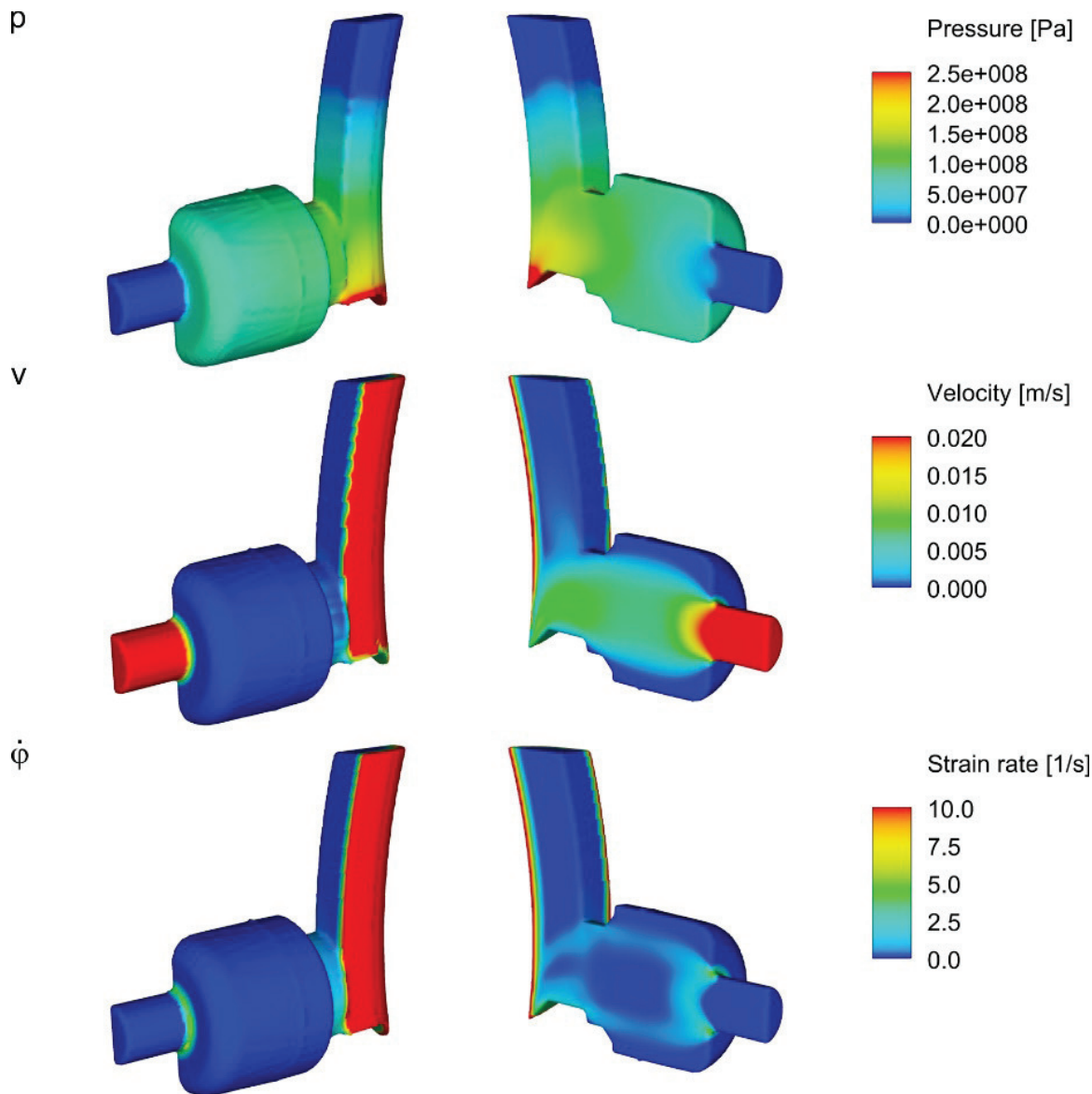


Abb. 6: Druck-, Geschwindigkeits- und Dehnungsratenverteilung in der Fluidomäne nach 50 s Verarbeitungszeit.

Die Geschwindigkeiten werden anschließend in der Druckkammer homogenisiert, und schließlich tritt das Material durch die Düsenöffnung mit konstanter Geschwindigkeit aus. Innerhalb der Druckkammer bewegt sich das Material in der Nähe der Kontaktgrenzfläche mit den umgebenden Komponenten nahezu nicht. Dehnungsraten entsprechen der Geschwindigkeitsverteilung, wie sie durch Ableitung errechnet werden. Die höchsten Werte werden an der Schnittstelle mit dem Rad und an der Düse beobachtet. Die geringeren Geschwindigkeitsgradienten innerhalb der Druckkammer führen zu geringeren Dehnungsraten.

Stromlinien zeigen die Richtung der Materialbewegung im Geschwindigkeitsfeld in der Fluidomäne. Abbildung 7 zeigt die durch numerische Simulation erhaltene Stromlinienverteilung. Die Stromlinien sind entsprechend den Dehnratenwerten gefärbt. Der interessanteste Teil der Fluidomäne ist eindeutig

der Bereich am Widerlager, an dem das Material umgelenkt wird. Gemäß den Simulationsergebnissen ist die Umlenkung nicht gleichmäßig und nicht gerade in Bezug auf die Extrusionsrichtung. Das Strömungsmuster erscheint verdreht, wenn Material von den Seitenwänden der Radnut in die Mitte der Fluiddomäne gedrückt wird.

Abgesehen von der Umlenkung am Widerlager als dem Hauptaspekt des Strömungsmusters wird eine Rezirkulation von Material in der Radnut beobachtet.

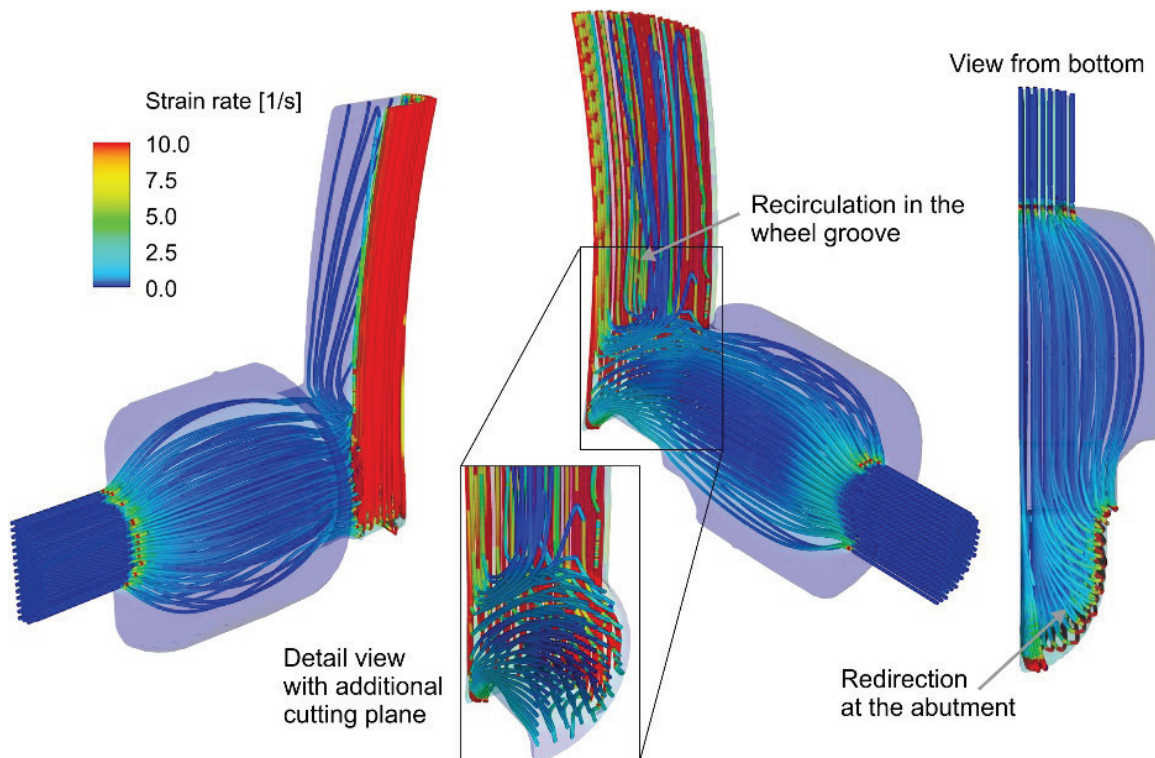


Abb. 7: Stromlinienverteilung, die die Materialbewegung im Fluidbereich darstellt.

Die Ergebnisse sind wertvoll in Bezug auf das Strömungsmuster in der Fluiddomäne, das komplexer als erwartet ist. Die Rückführung von Material ist ein wichtiger Aspekt für die Produktqualität, der insbesondere dann gilt, wenn die Dehnungsratenverteilung und die resultierende Scherung des Materials nicht homogen ist wie im vorliegenden Verfahren.

In Bezug auf numerische Aspekte ist der Prozess bei weitem nicht einfach zu modellieren. Vor allem die Griffzone bereitet aufgrund der damit verbundenen körnigen Strömung Schwierigkeiten. Dies wird Gegenstand zukünftiger Untersuchungen sein, da es ein Schlüsselement für die Modellierung des Prozesses ohne vorheriges Experiment ist. Dennoch ist das Ergebnis der Simulation für einen experimentell bekannten Volumenstrom eine wertvolle

Grundlage für die oben genannte Korrelation von Prozess- und Produktqualität.

## 5. Zusammenfassung

Der Temconex®-Prozess ist eine kontinuierliche Pulverextrusion, die dazu dient, Pulver zu Stangen oder Profilen zu verfestigen. Numerische Modellierung basierend auf der CFD-Software Flow3D zeigt ein Strömungsmuster, das komplexer ist als erwartet. Die höchsten Spannungen treten am Widerlager auf, an dem die Strömung umgeleitet wird. Es wird angenommen, dass die Umleitung in Bezug auf die Qualität des Produkts wichtig ist.

## 6. Literatur

- Gre 1972 D. Green; Improvements in or Relating to Extrusion; UK Patent 1370894; 1972
- She 1979 Sheppard, T.; Wright, D.S.: Determination of flow stress: Part 1 constitutive equation for aluminium alloys at elevated temperatures. Metals Technology 6 (1979) 215-223
- Sel 1966 Sellars, C.M.; Tegart, W.J.McG.: On the mechanism of hot deformation. Acta Metallurgica 14 (1966) 1136-1138
- Hun 1976 E. Hunter; Society of Manufacturing Engineers; Continuous extrusion by the Conform Process; SME MF 76-407; Dearborn Michigan; USA 1976
- Par 1980 J. A. Pardoe; The continuous extrusion of wire and sections from non-ferrous metal powders by the conform process; Advanced Metal Forming Group UK Atomic Energy Authority, Springfields Laboratories, Preston PR4 0RR England; Int. Powder Metallurgy Conf. Washington D. C.; June 1980
- Eth 1984 C. Etherington, H. K. Slater; The extrusion of Aluminium and its alloys by the conform process; International aluminium extrusion technology 3, Atherton; 1984
- Sla 1985 H. K. Slater, C. Etherington; Prospects for the continuous extrusion forming of new materials by the conform process; Proceedings of the 2. Conference on Materials Engineering; London; 1985
- Sta 2018 Stadelmann C., Lohmueller A., Hilbinger M., List M., Singer R. F.; Temconex® – Continuous powder extrusion – Heat balance and

extrusion pressure, to be published in: Materials Science and Engineering Technology

- Sta 2009 Stadelmann C.; Extrusion von Metallpulvern durch kontinuierliches Pulverstrangpressen; Ph. D. Thesis, FAU Erlangen-Nürnberg, 2009.
- Wil 2010 Williams, A.J., Slone, A.K., Croft, T.N., Cross, M.: A mixed Eulerian–Lagrangian method for modelling metal extrusion processes, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 199 (2010) 2123–2134
- Lou 2008 Lou, S; Zhao, G.; Wang, R.; Wu, X.: Modeling of aluminum alloy profile extrusion process using finite volume method. Journal of Materials Processing technology, 206, 2008, 481-490
- Bas 2008 Basic, H.: Friction models comparison in Finite Volume Method simulation of bulk metal forming technologies, Journal for Technology of Plasticity, Vol. 33 (2008), Number 1-2, 113-123
- Bre 2012 Bressan, J.D., Martins, M.M., Button, S.T.: Aluminium extrusion analysis by the Finite Volume Method, In: Proc. of XII Intl. Conference on Computational Plasticity. Fundamentals and Applications, COMPLAS XII, E. Oñate, D.R.J. Owen, D. Peric and B. Suárez (Eds)
- Sel 1972 Sellars, C.M.; Tegard, W.J.McG.: Hot workability. Intl. Metallurgical Rev., Vol. 17, 1972, 1-23