

# Hochleistungsbauteile durch Kaltmassivumformung hochfester, druckaufgestickter Stähle

J. Noneder<sup>1</sup>, M. Merklein<sup>1</sup>, U. Engel<sup>1</sup>, E. Egerer<sup>2</sup>, J. Frank<sup>3</sup>, M. Frank<sup>3</sup>, R. Ritzenhoff<sup>4</sup>, V. Diehl<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, Erlangen

<sup>2</sup> SSF-Verbindungsteile GmbH, Nürnberg

<sup>3</sup> Frank Formenbau GmbH, Obermässing

<sup>4</sup> Energietechnik Essen GmbH, Essen

## 1 Allgemeine Einführung und Motivation

Die Nachfrage nach hoch- und höchstfesten Bauteilen bei gleichzeitig verringertem Bauteilgewicht steigt in den letzten Jahren kontinuierlich an, um beispielsweise im Automobilssektor Grenzwerte für den CO<sub>2</sub>-Ausstoß einhalten zu können [1]. Aktuell werden solche Bauteile vorwiegend aus Vergütungsstählen hergestellt. Diese Werkstoffe werden nach der Umformung einer Vergütungsbehandlung zur gezielten Einstellung der mechanischen Eigenschaften unterzogen. Vor allem die Wärmebehandlung kann in Zeiten steigender Energiekosten und eines neuen Umweltbewusstseins einen kostenintensiven und umweltbelastenden Prozessschritt darstellen. Da Vergütungsstähle häufig nur einen sehr geringen Korrosionswiderstand aufweisen, müssen nach der Wärmebehandlung in den meisten Fällen aufwändige Korrosionsschutzmaßnahmen ergriffen werden. Eine Möglichkeit zur Vermeidung dieser Probleme der Wärmebehandlung und des nötigen Korrosionsschutzes stellt die Verwendung druckaufgestickter Stähle zur kaltumformtechnischen Herstellung von Bauteilen dar. Diese Stähle weisen neben einer hohen Kaltverfestigung auch eine exzellente Korrosions- und Spannungsrisskorrosionsbeständigkeit auf [2].

## 2 Stand der Technik

Im Folgenden sind der nationale und internationale Status Quo bei der Entwicklung und Anwendung druckaufgestickter Stähle und der Stand der Technik in den wesentlichen Arbeitsfeldern beschrieben.

### 2.1 Stand der Technik bei der Entwicklung und Anwendung druckaufgestickter Stähle

Druckaufgestickte Stähle und deren Nutzung gewinnen sowohl europaweit, als auch international zunehmend an Bedeutung. Insbesondere in Russland und im asiatischen Wirtschaftsraum steigt die Nachfrage [3, 4, 5, 6]. Ein wichtiger Hersteller druckaufgestickter Stähle ist die Energietechnik Essen GmbH. Hier wurden in den letzten Jahren unter anderem die druckaufgestickten Stähle P900N (1.3815 / X8CrMnN19-19) und P2000 (1.4452 / X13CrMnMoN18-14-3) entwickelt.

International werden neue Entwicklungen und Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der druckaufgestickten Stähle vorwiegend im Rahmen der „International Conference on High Nitrogen Steels“ diskutiert. Hier wird als großer Vorteil druckaufgestickter Stähle deren hervorragende Korrosions- und Spannungsrisskorrosionsbe-

ständigkeit genannt. Dies prädestiniert sie für einen Einsatz in der Energie-, Chemie- und Meerestechnik [7]. Daneben werden druckaufgestickte Stähle auch für die Herstellung von Rohrleitungen, Drähten und Kabeln eingesetzt. Jedoch haben druckaufgestickte Stähle aktuell nur einen sehr geringen Anteil als Werkstückwerkstoff in der klassischen Kaltmassivumformung, beispielsweise für Komponenten für Fahrzeuge oder Verbindungselemente. Auch international sind aktuell keine Forschungsbemühungen bekannt, welche die Anwendung druckaufgestickter Stähle als Werkstückwerkstoff zum Ziel haben.

## **2.2 Stand der Wissenschaft und Technik für das Projektziel**

Für die Forschungsarbeiten wird auf bereits vorhandene Kenntnisse über Werkzeugtechnik und Verfahren der Kaltmassivumformung sowie Simulationstechnik aufgebaut, um sie für die Nutzung druckaufgestickter Stähle als Werkstückwerkstoff weiterzuentwickeln.

### **2.2.1 Werkzeugtechnik für die Kaltmassivumformung**

Die Fertigungsgenauigkeit sowie die Wirtschaftlichkeit von Kaltmassivumformprozessen werden zu einem wesentlichen Teil von der Werkzeugtechnik bestimmt [19]. Ihr kommt daher eine entscheidende Bedeutung zu. Aufgrund der hohen Fließspannung des bei Raumtemperatur verarbeiteten Werkstückwerkstoffs und dessen zusätzlicher Kaltverfestigung während der Umformung kommt es zu hohen Dehnungsamplituden des Werkzeugs, welche die Fertigungsgenauigkeit beeinträchtigen und zu einer extrem hohen Werkzeugbeanspruchung führen. Dies kann zu einem Ausfall der Werkzeuge bereits nach wenigen Tausend produzierten Teilen führen. Da die Werkzeugkosten bis zu 15% der Fertigungskosten betragen, ist die Standmenge beziehungsweise Standzeit von zentraler Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit von Kaltmassivumformprozessen [8]. Bei einer Berücksichtigung der Stillstandzeiten der kapitalintensiven Fertigungsanlagen sowie Personalkosten kann davon ausgegangen werden, dass der Anteil der Werkzeugkosten an den Fertigungskosten sogar noch höher liegt. Wird zusätzlich die Produktion von Ausschuss bei unbemerktem Werkzeugversagen mit in die Kalkulation einbezogen, so kann ein Wert bis zu 30% der Fertigungskosten erreicht werden [9].

Um die Beanspruchbarkeit von Werkzeugen der Kaltmassivumformung zu erhöhen, wurde in der Vergangenheit gezielt in den Gebieten Werkzeugwerkstoff, Armierungssysteme und Beschichtungen geforscht. Im Bereich der Werkzeugwerkstoffe wurden von den Stahlherstellern pulvermetallurgische Werkzeugstähle entwickelt, die durch eine höhere Reinheit und Homogenität ihres Gefüges eine höhere Ermüdungsfestigkeit zeigen [10]. Für die Anwendung in Kaltumformwerkzeugen müssen die eingesetzten Werkzeugwerkstoffe zur Vermeidung einer plastischen Deformation hohe Härten aufweisen. Eine plastische Deformation von Werkzeugelementen führt häufig zu einem Werkzeugausfall aufgrund einer dauerhaft veränderten Gestalt, sodass keine Gutteile mehr produziert werden können. Um zuverlässige Werte zu bestimmen, ab wann es zu einer plastischen Deformation kommt beziehungsweise die Dehngrenze erreicht ist, wurden am LFT im Auftrag der German ColdForging Group (GCFG) Zug- und Druckversuche bei unterschiedlichen Härteniveaus an konventionell erschmolzenen und pulvermetallurgisch hergestellten Werk-

zeugstählen durchgeführt. Im Fokus der Arbeiten standen hier häufig in der Industrie eingesetzte Werkzeugstähle. Jedoch ist aus werkstoffwissenschaftlichen Betrachtungen bekannt, dass die Ermüdungsfestigkeit ab einer gewissen Grenze mit zunehmender Härte abnimmt. Aktuell sind jedoch keine Wöhlerkurven in der für die Werkzeugauslegung erforderlichen Genauigkeit verfügbar, sodass in der industriellen Praxis häufig auf Erfahrungswissen zurückgegriffen wird. Im Rahmen der GCFG wurde hierzu in einem Industriearbeitskreis im Jahr 2006 eine Werkstoffempfehlung für hochbeanspruchte Kaltumformwerkzeuge erarbeitet, welche diese Erfahrungen der deutschen Industrie zusammenführt und an deren Erarbeitung der LFT beteiligt war.

Die für die Kaltmassivumformung nötigen Werkstoffe mit hoher Härte weisen eine ausgeprägte Zugspannungsempfindlichkeit auf. Um die während eines Umformprozesses auftretenden Zugspannungen zu minimieren oder im optimalen Fall in den Druckbereich zu verlagern, werden deshalb durch einen Armierungsverbund von außen Druckspannungen in das Aktivelement, die Matrize, aufgebracht [11]. Dieser Vorgang wird auch als Vorspannen bezeichnet. Als Vorspannungssysteme werden in der Industrie Armierungsringe verwendet, in die der Formeinsatz mit Übermaß eingepresst wird. Weiterhin stehen auch Bandarmierungen zur Verfügung, bei denen ein Metallband unter Vorlast um einen Wickelkern aus Werkzeugstahl oder Hartmetall gewickelt wird. In diesen Wickelkern wird dann die Matrize eingepresst. Bandarmierungen können höhere Vorspannungen als Armierungsringe aufbringen. Die Verwendung von Hartmetall ermöglicht es aufgrund dessen hohen E-Moduls, die Steifigkeit des Werkzeugsystems weiter zu erhöhen [12].

Die tribologische und abrasive Beanspruchung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung kann durch den Einsatz einer Beschichtung beziehungsweise eines Beschichtungssystems teilweise erheblich reduziert werden. Diese Beschichtungen können zusätzlich oberflächenstrukturiert werden, um die Schmierstoffspeicherung in der Trennfuge zwischen Werkstück und Werkzeug zu erhöhen. Die Wirksamkeit dieser Maßnahme hinsichtlich einer höheren Werkzeuglebensdauer zeigt sich insbesondere bei Umformprozessen, in welchen beispielsweise ein Werkzeugelement sehr stark in das Werkstück eindringt und infolge dessen nur wenig Schmierstoff in der Wirkfuge zur Verfügung steht. [13]

Die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Methoden und Verfahren müssen bei der Umformung druckaufgestickter Stähle in Kombination miteinander eingesetzt werden, um hochbeanspruchbare Werkzeuge zu erhalten, welche in der Lage sind, den auftretenden Beanspruchungen zu widerstehen.

## 2.2.2 Grundlagen für Prozesse und Simulation in der Kaltmassivumformung

Seit etwa 60 Jahren stellt die Kaltmassivumformung eine anerkannte Möglichkeit dar, um bei Raumtemperatur oder minimaler Erwärmung Werkstoffe zu Bauteilen umzuformen. Durch die Kaltmassivumformung lassen sich mechanisch hochbelastbare und präzise Bauteile werkstoff- und energiesparend in großen Stückzahlen herstellen. Als Vorteile dieses Fertigungsverfahren können folgende Punkte angesehen werden:

- **Hohe Bauteilfestigkeit:** Aufgrund der während der Umformung auftretenden Kaltverfestigung des Werkstückwerkstoffs sind die hergestellten Bauteile mechanisch hoch beanspruchbar. Insbesondere bei dynamischer Beanspruchung weisen sie gegenüber zerspanend hergestellten Bauteilen aufgrund des Faserlaufs eine höhere Beanspruchbarkeit und somit Lebensdauer auf. Weiterhin zeichnen sich die Bauteile häufig durch eine geringe Oberflächenrauigkeit aus. Während der Umformung kann es zusätzlich zu für die Lebensdauer von Bauteilen günstigen Riss-schließeffekten kommen.
- **Werkstoff- und Energieeinsparung:** Im Gegensatz zu spanenden Fertigungsverfahren wird nur der dem Bauteilvolumen entsprechende Werkstoff benötigt. Im Gegensatz zum Schmieden muss der Rohling vor der Umformung nicht erwärmt werden. Dadurch kann eine erhebliche Energieeinsparung erzielt werden.
- **Hohe Maßhaltigkeit:** Durch die Herstellung von Bauteilen mittels Kaltmassivumformen lassen sich Qualitäten von IT 12 bis IT 7 erreichen. Dadurch ist es möglich, near-net-shape oder gar net-shape-Bauteile herzustellen. Dies ist erreichbar, da durch die Umformung bei oder sehr nahe Raumtemperatur, im Vergleich zum Schmieden, nur ein sehr geringer und damit in vielen Fällen vernachlässigbarer thermischer Verzug oder Schwindung auftritt [14].
- **Hohe Oberflächengüte:** Während es beim Schmieden zu einer Verzunderung der Oberfläche kommt, tritt dies beim Kaltmassivumformen nicht auf. Aufgrund dessen lassen sich bei werkzeuggebundener Umformung Oberflächengüten von bis zu  $R_a = 0,1 \mu\text{m}$  erreichen [15].
- **Hohe Mengenleistung:** In Abhängigkeit der Fertigungsanlage können Ausbringungsraten von etwa 100 bis zu über 500 Teile pro Minute erreicht werden. Dies ist im Vergleich zu spanenden Verfahren ein deutlicher Vorteil der Kaltmassivumformung.

Um alle Vorteile der Kaltmassivumformung auch bei komplexen Werkstückgeometrien unter Verwendung eines hochfesten Werkstückwerkstoffs ausschöpfen zu können, reicht aktuell das Erfahrungswissen zur Werkzeugauslegung nicht mehr aus. Um diesem Problem zu begegnen, wird gegenwärtig vermehrt auf den Einsatz der Finite-Elemente-Methode (FEM) zurückgegriffen, die in den vergangenen Jahren für die Prozess- und Werkzeugentwicklung eine immer stärkere Bedeutung erlangt hat. Die FE-Simulation ermöglicht die Modellierung des Stoffflusses bei ein- oder mehrstufigen Umformprozessen zur Kontrolle der Formfüllung oder zur Vorhersage von Umformfehlern wie Faltenbildung. Ebenso kann mit Hilfe der FEM die Werkzeugbeanspruchung bestimmt werden. Dies ist von umso höherer Bedeutung, da aktuell keine Arbeiten beziehungsweise Erfahrungswissen in der Umformung besonders hochfester Werkstoffe, wie den druckaufgestickten Stählen, vorliegen.

### 2.2.3 Simulationsmodelle für die Werkzeugauslegung

In der industriellen Praxis wird aktuell überwiegend mittels Erfahrungswissen oder einfachen Programmen zur Abschätzung der Beanspruchung, beispielsweise mit Programmen, basierend auf den Lagrange'schen Gleichungen, die Werkzeugauslegung vorgenommen. Sofern eine Simulation durchgeführt wird, werden überwiegend nur starre Werkzeuge betrachtet. Dadurch kann der Stofffluss während des Umformvorgangs abgebildet werden. Bei der Verwendung von starren Werkzeugen sinkt der Modellierungsaufwand bei gleichzeitig reduzierter Rechenzeit und höherer Stabilität der Simulation. Zur Berechnung der Spannungen und Dehnungen im Werkzeug müssen hingegen auch alle Werkzeugkomponenten einschließlich Armierung als deformierbare Körper in der FE-Simulation modelliert werden. Bei zweidimensionalen, rotationssymmetrischen Bauteilen und Werkzeugen kann eine gekoppelte Simulation durchgeführt werden. Dabei werden sowohl der Werkstofffluss als auch die Werkzeugbeanspruchung gemeinsam berechnet. Dies ist ebenso für dreidimensionale Modelle möglich, jedoch erhöht sich hier der Modellierungsaufwand und der Rechenbedarf erheblich. Bei einer entkoppelten Modellierung wird zunächst der Umformvorgang mittels eines deformierbaren Werkstücks mit starren Werkzeugen berechnet. Im Anschluss werden die resultierenden Kontaktspannungen auf ein separates Modell mit deformierbaren Werkzeugelementen übertragen [16]. Da die Deformationen des Werkzeugs gegenüber der Formgebung des Werkstücks deutlich geringer sind, weist diese entkoppelte Berechnungsvariante nur einen vernachlässigbar kleinen Fehler gegenüber der vollständigen kombinierten Modellierung auf.

In der industriellen Praxis wird deshalb der zusätzliche Modellierungsaufwand für die Werkzeugsimulation gescheut, da klare Grundlagen für die simulationsbasierte Werkzeugauslegung fehlen. Durch einen Vergleich verschiedener Varianten kann ermittelt werden, bei welcher höhere beziehungsweise niedrigere Spannungen auftreten. Ein großer Entwicklungsbedarf besteht allerdings noch bei Schädigungsmodellen, welchen den Ort des Werkzeugausfalls und die mit dem Werkzeug erzielbare Lebensdauer vorhersagen. Dies ist deshalb so schwierig, da die Werkzeugermüdung von vielen Faktoren, etwa der Ermüdungsfestigkeit des Werkstoffs, der Dehnungsamplitude, der statischen Mitteldehnung oder von der Oberflächenbearbeitung des Werkzeugs abhängt. Zwar existieren spannungs-, dehnungs- und energie-basierte Schädigungsmodelle, jedoch sind diese nicht allgemeingültig verifiziert und werden deshalb in der betrieblichen Praxis nur in einigen wenigen Spezial- und Einzelfällen angewendet [17].

Um die Werkzeuglebensdauer zu steigern und Anhaltspunkte für die FE-basierte Auslegung von Kaltmassivumformwerkzeugen zu erhalten, wurden verschiedene Untersuchungen durchgeführt [18]. Diese haben jedoch keinen Bezug zur kaltumformtechnischen Nutzung von druckaufgestickten Stählen. So wurde beispielsweise im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts COLT (Improvement of service life and reliability of cold forging tools with respect to fatigue damage due to cyclic plasticity) die Ermüdung von Werkzeugstählen in der Kaltmassivumformung untersucht. Die dabei erreichten Erkenntnisse können als Grundlage für die Entwicklung von Schädigungsmodellen für Kaltmassivumformwerkzeuge dienen. In den vergangenen Jahren haben sich durch die rasante Entwicklung im Bereich der

FE-Simulation mit stetig steigenden Rechenleistungen und verbesserten Funktionalitäten der Simulationsprogramme verbesserte Berechnungsmöglichkeiten ergeben. Dies ist zum Beispiel die genaue 3D-Berechnung des Spannungs-Dehnungsverhaltens für komplexe oder sogar geteilte Umformwerkzeuge einschließlich des Vorspannungssystems.

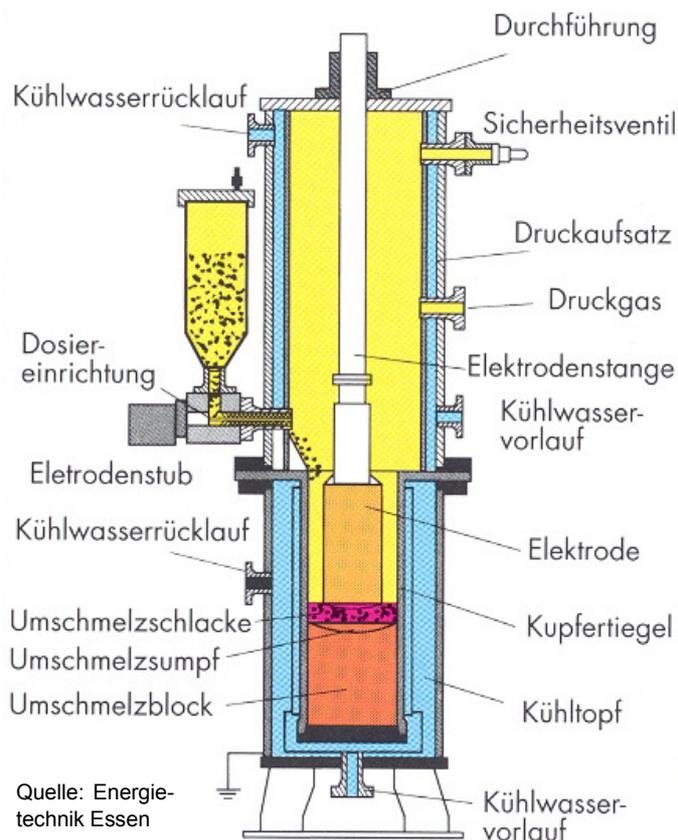
### **3 Zielsetzung und Methodik**

Im Fokus der Forschungsarbeiten steht daher die Qualifizierung hochverfestigender druckaufgestickter Stähle für die kaltumformtechnische Herstellung von Bauteilen. Um dies zu erreichen, mussten verschiedenen Herausforderungen, zum Beispiel die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften, gelöst werden. Die zentrale Fragestellung im Rahmen der Forschungsarbeiten war die Prozess- und Werkzeugauslegung. Hierzu zählen insbesondere die Entwicklung und Herstellung hoch beanspruchbarer Werkzeugsysteme. Im Rahmen der Arbeiten wurden neben Versuchen zur Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften druckaufgestickter Stähle auch Modellumformversuche, beispielsweise Voll-Vorwärts-Fließpressen (VVFP), durchgeführt. Durch die Ergebnisse aus den Modellversuchen ist es möglich, die zur Werkzeugauslegung verwendeten FE-Modelle zu validieren. Dies ist von entscheidender Bedeutung, da diese Modelle maßgeblich für die spätere Prozess- und Werkzeugauslegung des industriellen Referenzprozesses genutzt werden. Im Rahmen der Modellversuche musste auch ein hochbeanspruchbares Werkzeugkonzept entwickelt werden, um den auftretenden Beanspruchungen widerstehen zu können. Die hierfür nötigen Untersuchungen wurden anhand FE-Simulationen durchgeführt. Die Werkzeuge, welche in den industriellen Referenzuntersuchungen eingesetzt werden sollen, wurden ebenfalls mittels FE-Simulation ausgelegt. Durch die Durchführung von Untersuchungen im industriellen Umfeld konnte gezeigt werden, dass die Werkzeuge den Beanspruchungen widerstehen, jedoch noch Optimierungsbedarf hinsichtlich der erreichten Standmengen besteht. Die Ergebnisse der Forschungsarbeiten werden abschließend in einer Richtlinie zur Prozess- und Werkzeugauslegung zusammengefasst, um zukünftige Prozess, bei welchen druckaufgestickte Stähle als Werkstückwerkstoff verwendet werden, effizient auslegen zu können. Die Forschungsergebnisse stellen somit wichtige Erkenntnisse für die kaltumformtechnische Verarbeitung höchstfester Werkstoffe dar.

## 4 Untersuchungen und Ergebnisse

### 4.1 Prozesskette der Materialherstellung

Für die Neufertigung von warmgewalzten Draht aus 1.3815 für die Versuchsserien war es zuerst nötig, einen Block aus druckaufgesticktem Stahl, Charge D28171, mittels der Druck-Elektro-Schlacke-Umschmelzanlage, vergleiche Abbildung 1, herzustellen.



**Abbildung 1:** Schematische Darstellung einer DESU-Anlage

Die dafür benötigten Elektroden (Charge: V113514, Durchmesser: 670 mm, Gewicht: ca. 5600 kg, 2 Stück) wurden in einem ersten Schritt auf einen Durchmesser von 500 mm freiformgeschmiedet, um sie nachfolgend in einem Tiegel mit einem Durchmesser von 630 mm umschmelzen zu können. Im Anschluss hieran wurden jeweils die Kopf- und Stirnflächen abgebrannt, sowie die Mantelfläche geschliffen und ein Stub (Halterung) an die Elektrode angeschweißt.

Nach Abschluss des Umschmelzens und Erstarrens wurde der Block aus dem Ofen entfernt und zum Abkühlen abgelegt. Im Rahmen dieses Umschmelzvorgangs wurde der Werkstoff mittels Siliziumnitrid ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) aufgestickt. Aus dem runden Block mit einem

Durchmesser von ca. 620 mm sollte im nachfolgenden Walzvorgang eine Bramme mit einem quadratischen Querschnitt mit einer Kantenlänge von 180 mm hergestellt werden. Aufgrund übermäßiger Rissbildung an der Oberfläche des Werkstücks wurde dieser Vorgang bei einer Knüppelabmessung von ungefähr  $300 \times 500 \times 4300 \text{ mm}^3$  jedoch eingestellt. Da für einen weiteren Walzvorgang eine rissfreie Oberfläche zwingend erforderlich ist, musste zusätzlich ein geeigneter Bearbeitungsschritt durchgeführt werden. Im Rahmen des Schleifprozesses wurde gerade so viel Material abgetragen, dass eine rissfreie Oberfläche erreicht werden konnte. Dies wurde mittels einer Farbeindringprüfung sichergestellt. Nach dem Schleifvorgang wurde der Knüppel wieder in die Walzstraße eingeschleust und ein quadratischer Querschnitt mit einer Kantenlänge von 180 mm erzeugt. Da die so hergestellten Knüppel hohe Umformgrade und Eigenspannungen aufweisen, wurde nach Abschluss des Walzens

ein Lösungsglühvorgang bei 1080 °C angeschlossen, da bei der weiteren Verarbeitung des Materials unter allen Umständen Spannungsrisse vermieden werden müssen. Da nach dem Walzen und Lösungsglühn nicht ausgeschlossen werden kann, dass die Oberfläche des Werkstücks keine Risse aufweist, wurden die Knüppel nochmals geschliffen. Die Beschaffenheit dieser Knüppel nach dem Schleifvorgang ist in Abbildung 2 dargestellt.



**Abbildung 2:** Knüppel nach Schleifen mit 120 mm Kantenlänge

Zur Analyse und zur Bestätigung einer erfolgreichen Aufstickung wurden an drei Stellen des Vormaterialknüppels (Fuß, Mitte und Kopf) über den gesamten Querschnitt (Rand, Übergang und Kern) Proben entnommen. Die Mittelwerte der Ergebnisse der Materialanalyse sind in Tabelle 1 dargestellt.

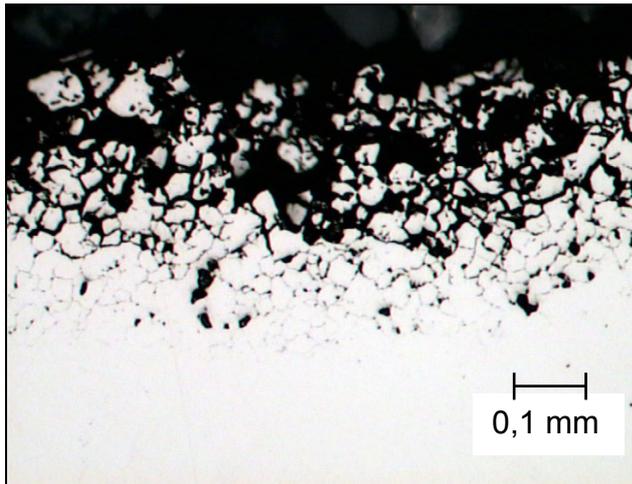
Nach der Schleifbearbeitung und Entnahme der Probenscheiben stand Probenmaterial mit einer Gesamtmasse von 3100 kg zur Weiterverarbeitung zur Verfügung. Unter den Gesichtspunkten der maximalen Einsatzlänge im Schmeldeofen und der minimal nötigen Masse für die weitere Verarbeitung der Knüppel durch Warmwalzen wurde entschieden, auf die optimale Ausbringungsmenge zu verzichten. Daher wurden die Knüppel auf die entsprechende maximale Einsatzlänge gekürzt. Die jeweiligen Massen der Knüppel betragen A = 660, B = 645 und C = 635 kg. Ausgehend von der Vormaterialabmessung von ca. 170

mm Vierkant wurden Knüppel auf eine Kantenlänge von 120 mm geschmiedet. Die Gesamtausbringungsmenge nach dem Schmieden auf 120 mm Kantenlänge betrug 1810 kg.

**Tabelle 1** Analyseergebnis von Proben aus 1.3815 – Charge D28171 (Angaben der einzelnen im Stahl enthaltenen Elemente in Gewichtsprozent)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V	Al	Ti	Cu	N
0,08	0,95	18,86	0,022	0,001	17,07	0,08	0,58	0,05	0,009	0,001	0,04	0,76

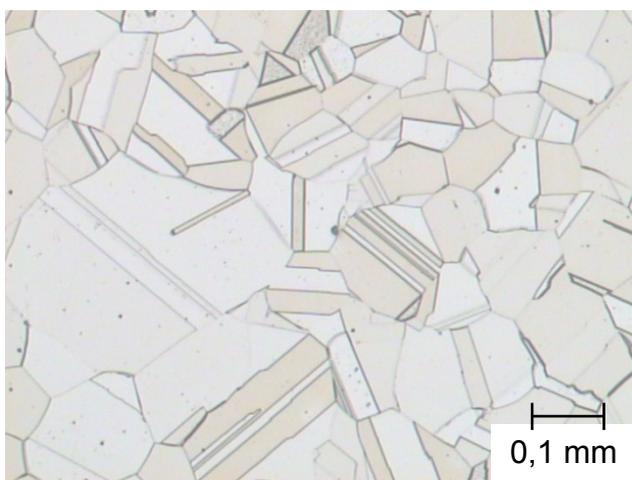
Bei dem nach dem Warmwalzen beziehungsweise vor dem Kaltwalzen nötigen Beizen zum Entfernen der Zunderschicht zeigte sich, dass es zu einem korrosiven Korngrenzenangriff und Kornzerfall an der Oberfläche bis zu einer Tiefe von 0,15 mm kommt. Diese Materialbeeinträchtigung ist in Abbildung 3 dargestellt.



Quelle: Energietechnik Essen GmbH

**Abbildung 3:** Oberflächenangriff nach Beizversuchen mit 1.3815

Entzunderung des Vormaterials gewählt. Als geeignetes Verfahren kam hier das Drehschälens zum Einsatz, durch welches ein Draht aus druckaufgesticktem Stahl mit einem Durchmesser von 10 mm hergestellt wurde. Nach dem Drehschälens wurde das Material nochmals lösungsgeglüht, um die durch das Drehschälens eingebrachte Kaltverfestigung zu minimieren. Da im Rahmen dieser finalen Wärmebehandlung auf eine hohe Ausscheidungsfreiheit des Werkstoffs geachtet werden musste, wurden in einem Vakuumofen verschiedene Wärmebehandlungen mit unterschiedlichen Parameterkonfigurationen von Temperatur und Haltedauer bei einer vollständigen Stickstoffatmosphäre durchgeführt. Hier zeigten die Ergebnisse metallografischer Untersuchungen, dass ein optimales Ergebnis bei einer Temperatur von 1100 °C und einer Haltezeit von 1 h erreicht wird. Nach Ablauf der einstündigen Glühdauer wird der Draht aus druckaufgesticktem Stahl mittels Stickstoff bei einem Druck von 10 bar abgeschreckt. Dadurch kann ein ausscheidungsfreies, lösungsgeglühtes Gefüge, wie in Abbildung 4 dargestellt, erreicht werden.



Quelle: Energietechnik Essen GmbH

**Abbildung 4:** Ausscheidungsfreies Gefüge

Aufgrund dieser Materialschädigung wurde die Identifikation eines geeigneten alternativen Beizverfahrens notwendig. In einem ersten Schritt war die Verweilzeit des Beizgutes in der Beize verringert. Dadurch konnte bereits ein verringerter Korngrenzenangriff erreicht, jedoch nicht vollständig vermieden werden. Andere chemische Entzunderungsverfahren wurden ebenfalls auf ihre Eignung hin untersucht, jedoch waren die Ergebnisse ebenfalls nur unzureichend. Aufgrund dieser Gegebenheiten wurde eine mechanische

Entzunderung des Vormaterials gewählt. Als geeignetes Verfahren kam hier das Drehschälens zum Einsatz, durch welches ein Draht aus druckaufgesticktem Stahl mit einem Durchmesser von 10 mm hergestellt wurde. Nach dem Drehschälens wurde das Material nochmals lösungsgeglüht, um die durch das Drehschälens eingebrachte Kaltverfestigung zu minimieren. Da im Rahmen dieser finalen Wärmebehandlung auf eine hohe Ausscheidungsfreiheit des Werkstoffs geachtet werden musste, wurden in einem Vakuumofen verschiedene Wärmebehandlungen mit unterschiedlichen Parameterkonfigurationen von Temperatur und Haltedauer bei einer vollständigen Stickstoffatmosphäre durchgeführt. Hier zeigten die Ergebnisse metallografischer Untersuchungen, dass ein optimales Ergebnis bei einer Temperatur von 1100 °C und einer Haltezeit von 1 h erreicht wird. Nach Ablauf der einstündigen Glühdauer wird der Draht aus druckaufgesticktem Stahl mittels Stickstoff bei einem Druck von 10 bar abgeschreckt. Dadurch kann ein ausscheidungsfreies, lösungsgeglühtes Gefüge, wie in Abbildung 4 dargestellt, erreicht werden.

Im Anschluss an den Prozessschritt des Lösungsglühens wurde ein abschließender Ziehvorgang durchgeführt, um den für die industriellen Fertigungsversuche notwendigen Durchmesser von 9,80 mm zu erreichen. Hierbei wurde als ISO-Toleranz h9 gewählt, um einen definierten Durchmesser des Halbzeugs zu erhalten. Der Durchmesser des einsatzfertige Drahtes wurde im Anschluss an den Ziehvorgang an verschiedenen Stellen überprüft, um sicherzustellen, dass geometriebedingte Schwankungen

im Prozess, hervorgerufen durch zu hohe Streuungen des Durchmessers des Rohlings, minimiert werden können. Während des Ziehvorgangs wird auch bereits eine speziell für rostfreie Güten entwickelte Schmierstoffträgerschicht auf den Draht aufgebracht. Hierbei handelt es sich um eine Beschichtung der Firma CONDAT (Chasse-sur-Rhône, Frankreich). Mit Hilfe dieser Schicht kann die Schmierstoffanhaftung im nachfolgenden Kaltmassivumformprozess verbessert werden. Da somit günstigere tribologische Bedingungen vorliegen, kann davon ausgegangen werden, dass auch die Werkzeugbeanspruchung dadurch günstig beeinflusst wird.

Der vorher beschriebene Drahtherstellungsvorgang ist kosten- und zeitintensiv. Aufgrund dessen wurden im Rahmen der Forschungsarbeiten auch Möglichkeiten zur schnelleren und einfacheren Herstellung von gezogenem Draht aus druckaufgestickten Stählen entwickelt. Im Fokus der Bemühungen steht das Einsparen von Umhaspelvorgängen, welche nach jedem Lösungsglühvorgang und der Weiterverarbeitung nötig sind. Um dies zu erreichen, wurde Knüppelmaterial mit einer Kantenlänge von 120 mm hergestellt und anschließend ohne Glühvorgang warm auf einen Durchmesser von 11 mm heruntergewalzt. Dieser Draht wurde anschließend sofort, ohne vorheriges Beizen beziehungsweise Drehschalen lösungsgeglüht, so dass dieser Umhaspelvorgang ebenfalls entfällt. Nach dem Lösungsglühen wurde der Draht auf einen Durchmesser von 10 mm drehgeschält und direkt danach, ohne erneutes Haspeln auf 9,80 mm gezogen. Im Vergleich zur vorher beschriebenen Fertigungskette kann dadurch eine erhebliche Verkürzung der Prozesskette erreicht werden.

Dieser neue Fertigungsablauf wurde anschließend auch zur Herstellung von Bauteilen aus P2000 (1.4452) angewendet, der eine höhere Festigkeit aufweist. Auch dieser Werkstoff wurde im Rahmen der Forschungsarbeiten auf seine Eignung als Werkstückwerkstoff in der Kaltmassivumformung hin untersucht.

## **4.2 Erarbeitung der Werkstoff- und Prozessgrundlagen**

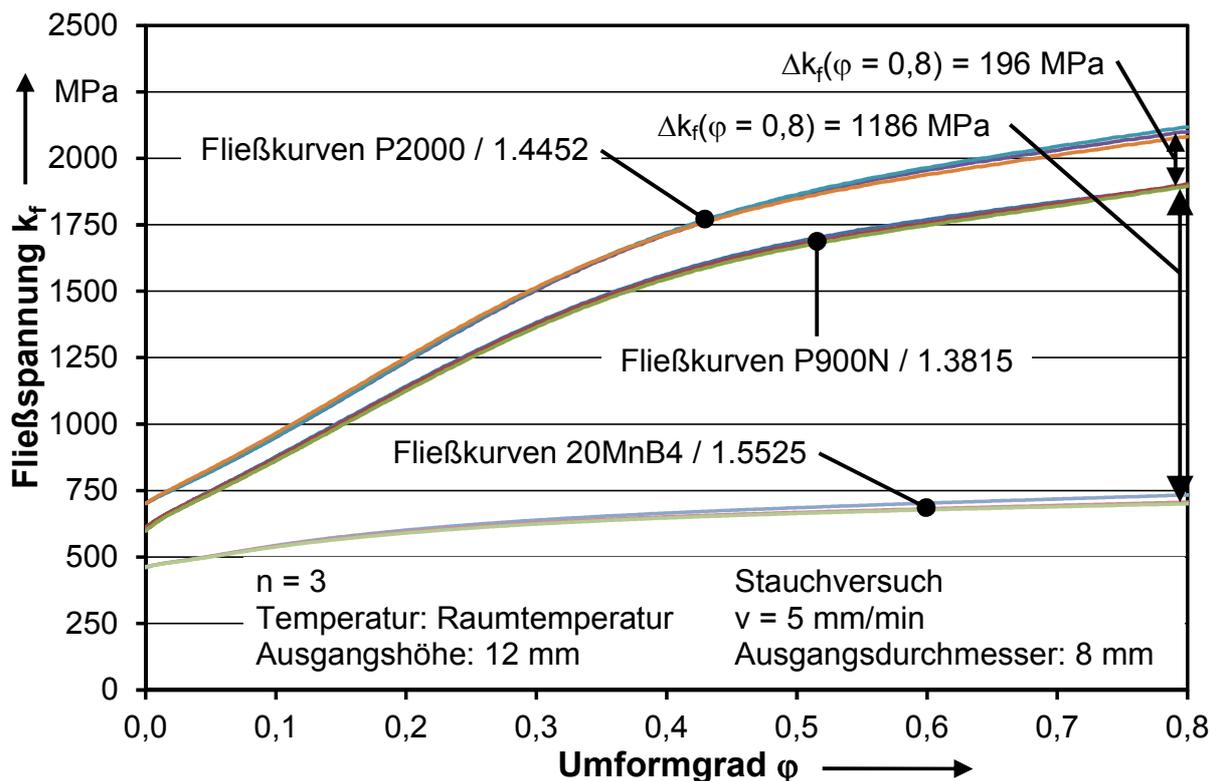
Zu Beginn der Forschungsarbeiten stand die Schaffung der zur Durchführung der Folgearbeiten zwingend benötigten Werkstoff- und Prozessgrundlagen im Fokus. Hierzu zählten insbesondere Experimente zur Erfassung der Fließkurve der verwendeten druckaufgestickten Stähle.

Zuerst standen Stauchversuche bei Raumtemperatur mit den druckaufgestickten Stählen 1.3815 (P900N / X8CrMnN19-19) und 1.4452 (P2000 / X13CrMnMoN18-14-3) sowie mit dem wärmebehandelbaren Stahl 1.5525 (20MnB4) im Fokus der Untersuchungen. Der Werkstoff 20MnB4 wurde hier als Referenz verwendet, da dieser häufig zur Herstellung von Hochleistungsbauteilen verwendet wird, wobei jedoch die mechanischen Eigenschaften der Bauteile in den überwiegenden Fällen durch eine nachgeschaltete Wärmebehandlung eingestellt werden. Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden die Fließkurven der untersuchten Werkstoffe mittels zweier verschiedener, nachfolgend genannter Methoden berechnet:

- um Maschinenauffederung korrigierter Traversenweg und
- optisches Dehnungsmesssystem ARAMIS.

Wird ARAMIS zur Dehnungsmessung verwendet, so kann auch ein eventuelles anisotropes Formänderungsverhalten des Werkstoffs zuverlässig festgestellt

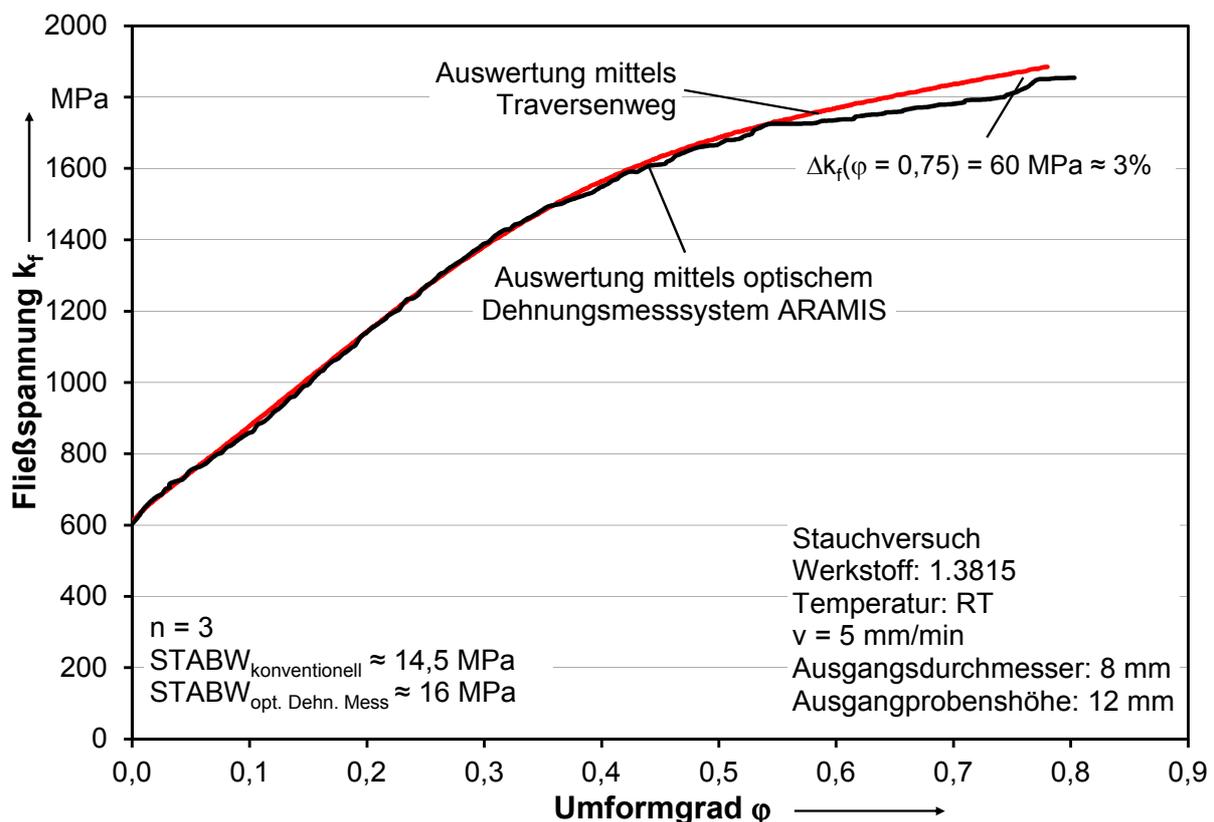
werden. Nach Abschluss der Versuche wurden die Fließkurven einmal mittels ARAMIS (Firma GOM mbH, Braunschweig) und einmal mittels dem in Lange [19] beschriebenen Verfahren, bei welchem der um die Maschinenauffederung korrigierte Traversenweg genutzt wird, berechnet. Die nach dem Verfahren von Lange ermittelten Kurven sind in Abbildung 5 dargestellt. Sowohl bei X8CrMnN19-19 (P900N) als auch bei X13CrMnMoN18-14-3 (P2000) ist zu erkennen, dass die Abweichungen der einzelnen Versuche zueinander sehr gering sind. Die Streckgrenze  $R_{p0,2}$  von P900N beträgt etwa 600 MPa, die von P2000 circa 710 MPa. Bei einem Umformgrad von  $\varphi = 0,8$  ergibt sich bei den Fließspannungen beider Stähle ein Unterschied von 196 MPa. Im Vergleich zu 1.3815 weist der Stahl 1.4452 somit eine um zehn Prozent erhöhte Endfestigkeit auf. Dadurch ist bei der Umformung von X13CrMnMoN18-14-3 eine erhöhte Werkzeugbeanspruchung zu erwarten. Im Vergleich zum wärmebehandelbaren Stahl 1.5525 weist 1.3815 eine um knapp 1190 MPa höhere Fließspannung bei  $\varphi = 0,8$  auf. Aufgrund dieser deutlicher erhöhten Fließspannung eignen sich druckaufgestickte Stähle zur Herstellung von Hochleistungsbauteilen ohne nachfolgende Wärmbehandlung, da die Festigkeit alleine durch Kaltverfestigung erreicht werden kann. Jedoch ist zur Umformung ein hochbeanspruchbares Werkzeugsystem notwendig, da aufgrund der hohen Fließspannung hohe Werkzeugbeanspruchungen auftreten.



**Abbildung 5:** In Stauchversuchen aufgenommene Fließkurven der druckaufgestickten Stähle 1.3815 und 1.4452, sowie des wärmebehandelbaren Stahls 1.5525

Ein Vergleich der Resultate der verschiedene Auswerteverfahren, auffederungskorrigierter Traversenweg und optische Dehnungsmesssystem ARAMIS, wird exemplarisch am Stauchversuche für 1.3815 durchgeführt. Für den zweiten druck-

aufgestickten Stahl, 1.4452, wurden ähnliche Ergebnisse erreicht. Ziel dieser Untersuchungen war es, eventuelle Abweichungen, hervorgerufen durch unterschiedliche Auswertemethoden, aufzuzeigen und deren Folgen für die Werkzeugauslegung zu diskutieren. In Abbildung 6 ist eine Gegenüberstellung der mit den verschiedenen Methoden erfassten Fließkurven des druckaufgestickten Stahls 1.3815 dargestellt. Bis zu einem Umformgrad von  $\varphi = 0,55$  zeigen die beiden Kurven eine gute Übereinstimmung. Ab diesem Punkt entfernen sich die Kurven voneinander. Die maximale Abweichung tritt bei einem Umformgrad von  $\varphi = 0,75$  auf. Der Unterschied zwischen beiden Kurven beträgt hier knapp 60 MPa. Hierbei ist festzuhalten, dass die mittels auffederungskorrigiertem Traversenweg bestimmte über der mit ARAMIS bestimmten Kurven befindet. Vor dem Hintergrund der Werkzeugauslegung ist es sinnvoll, für die FE-Simulationen die mittels Traversenweg bestimmte Kurve zu nutzen, um gezielt einer konservativen Auslegung der Werkzeug Vorrang zu gewähren. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Werkzeugbeanspruchung tendenziell eher überals unterschätzt wird. Aufgrund dessen werden die Werkzeuge auf eine höhere Beanspruchbarkeit hin ausgelegt, was wiederum die Gefahr eines Versagens der Werkzeuge minimiert.



**Abbildung 6:** Gegenüberstellung verschiedener Auswertemethoden für die Fließkurve des druckaufgestickten Stahls 1.3815 [20]

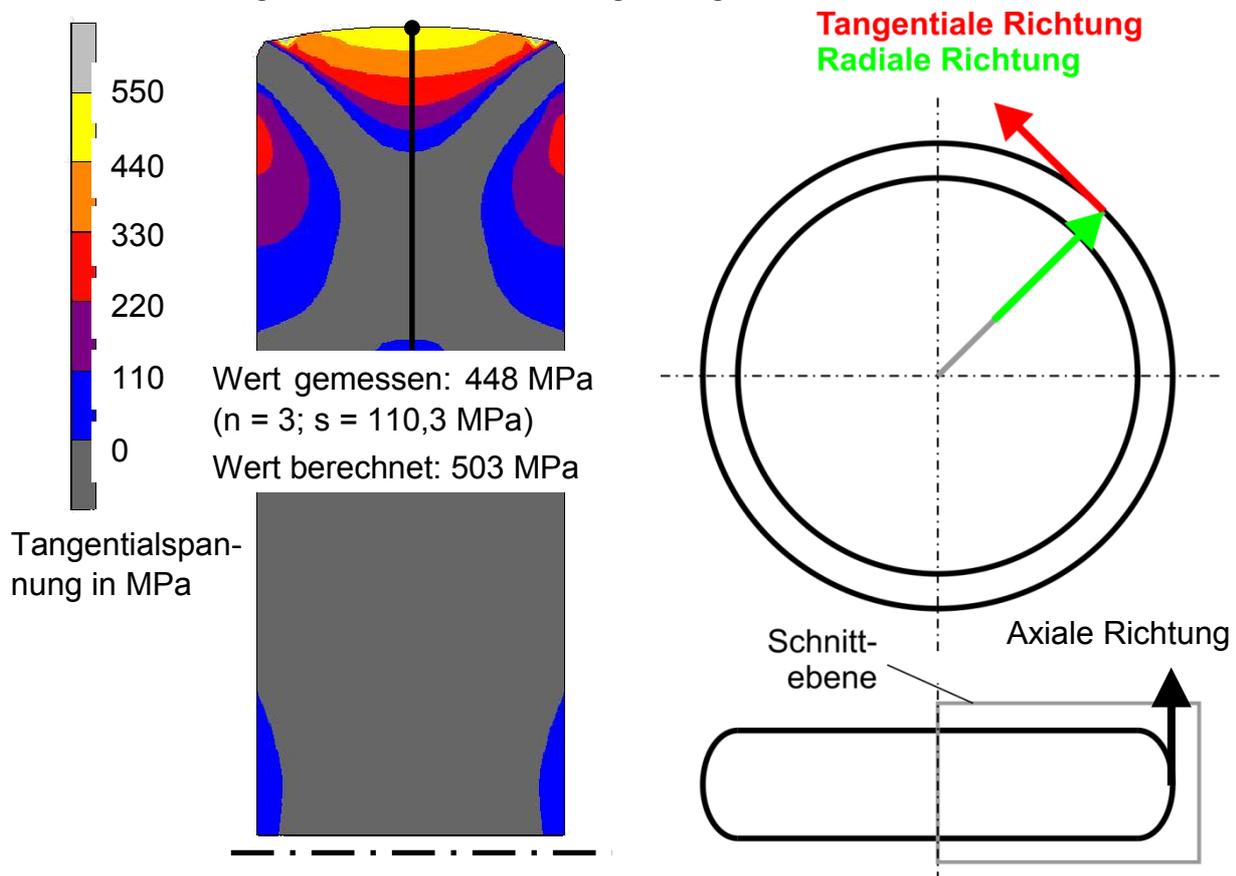
Gemäß Wildau [21] kann es während der Umformung von austenitischen Werkstoffen zu einer Martensitbildung kommen. Da dies auf die Werkzeugbeanspruchung einen wesentlichen Einfluss hat, wurden ergänzend zu den metallografischen Untersuchungen auch Experimente zur Bestimmung des Martensitanteils in Proben

durchgeführt. Bei Martensit handelt es sich, ebenso wie bei Delta-Ferrit, um eine magnetische Phase von Werkstoffen. Da bei austenitischen Edelstählen jedoch keine Bildung von umformbedingten Delta-Ferrit auftritt, kann durch die Messung des magnetischen Anteils der Probe direkt auf den Martensitgehalt geschlossen werden. Für die hierfür nötige Messung wurde ein Feritscope FMP 30 der Firma Helmut Fischer GmbH (Sindelfingen) genutzt. Mit diesem Gerät kann ein Phasenanteil zwischen 0,1 und 80% an magnetischer Phase festgestellt werden. Die Untersuchungen hinsichtlich des magnetischen Anteils wurden sowohl an Bruchflächen von Zug-, als auch an geschliffenen und polierten Querschnittsflächen von Stauchproben,  $\varphi = 0,8$ , durchgeführt. Da insbesondere an Bruchflächen von Zugproben eine hohe räumliche Auflösung nötig ist, wurde eine Sonde mit einem Sondenpolradius von 0,3 mm verwendet. Im Rahmen der durchgeführten Messungen konnte jedoch kein magnetischer Anteil in den untersuchten Proben festgestellt werden. Aufgrund dieser Ergebnisse kann somit ausgeschlossen werden, dass es bei den untersuchten druckaufgestickten Stählen zu einer umformbedingten Martensitbildung kommt.

Während der Zug- und Stauchversuche wird Umformarbeit verrichtet, welche eine Temperaturerhöhung zur Folge hat. Daher wurde in zusätzlichen Experimenten untersucht, inwieweit die Umformgeschwindigkeit von 5 mm/min einen Einfluss auf die Erwärmung der Probe hat. Es ist von zentraler Bedeutung, dass sich die Probe nicht übermäßig erwärmt, um so keine verfälschten Fließkurven aus den Experimenten zu erhalten. Bei der gewählten Umformgeschwindigkeit sollte jedoch ausreichend Zeit für einen Abfluss der Wärme vom Probeninneren in die äußeren Bereiche und letztendlich in die Stauchwerkzeuge bestehen. Um dennoch zu überprüfen, ob es zu einer signifikanten Erhöhung der Temperatur im Inneren der Probe kommt, wurden in Stauchproben Thermoelemente vom Typ NiCr-Ni Typ K (Firma Herth elektrische Temperaturregeber GmbH, Werne) eingebracht und Stauchversuche durchgeführt. Insgesamt wurden 3 Stauchversuche mit speziell präparierten Proben vorgenommen. Die Ergebnisse zeigen, dass es bei einem Umformgrad von  $\varphi = 0,6$  zu einer Temperaturerhöhung von 19,7 K im Inneren der Probe kommt. Die Messung bei höheren Umformgraden ist nicht möglich, da es bei  $\varphi = 0,6$  zu einer Zerstörung des Thermoelements kommt. Es kann jedoch auf dieser Datenbasis davon ausgegangen werden, dass die gemessene Temperaturerhöhung nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf die erfassten Kurven hat und daher nicht weiter untersucht werden muss.

Neben der Kaltverfestigung stellen auch Eigenspannungen eine wichtige Materialeigenschaft dar. Die im Werkstoff auftretenden Eigenspannungen hängen unter anderem von der Umformhistorie des Werkstücks ab. Ein einfaches Werkstück stellt eine Zylinderstauchprobe dar. An dieser werden erste Untersuchungen durchgeführt, da es sich hier um eine rotationssymmetrische und einfache Geometrie handelt. Dadurch ist es ohne großen Rechenaufwand möglich, die experimentellen Daten mit numerischen Daten abzugleichen. Auf diesem Weg kann auch eine qualitative Validierung von FE-Modellen vorgenommen werden, sodass es unter Umständen möglich wird, die Bauteileigenschaften druckaufgestickter Stähle anhand der Simulation vorherzusagen. Zu Beginn der Untersuchungen wurden Eigenspannungsmessungen

an einer Stauchprobe aus 1.3815, welche bis zu einem Umformgrad von  $\varphi = 1,1$  gestaucht wurde, durchgeführt. Diese Untersuchungen wurden mit Hilfe eines 8-Achsen Röntgendiffraktometers Seifert Stress Analyser XRD 3003 vorgenommen. Es wurden gezielt Eigenspannungsmessungen an der Mantelfläche der Stauchprobe durchgeführt, da es sich hier um eine freie Umformoberfläche handelt und es somit zu keiner Beeinflussung der Eigenspannung durch ein Umformwerkzeug kommen kann. Die Messungen wurden unter Nutzung eines Kollimators mit einem Brennfleckdurchmesser von 0,3 mm durchgeführt. Die Messungen wurden sowohl in tangentialer, als auch in axialer Richtung vorgenommen. Dies hat den Vorteil, dass während der Messung nur ein sehr kleiner Bereich abgetastet wird und es somit zu keinem iterativen Ergebnis mit Nachbarbereichen kommt. Ein Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Daten zeigt, dass die Eigenspannungen in tangentialer Richtung eine ausreichende Übereinstimmung zeigen. Es tritt hier lediglich eine Abweichung von etwa 55 MPa auf. Die axiale Komponente liegt in beiden Fällen bei Null und die Differenz zwischen Simulation und Experiment, 11 MPa, kann vernachlässigt werden. Eine grafische Gegenüberstellung der tangentialen Messergebnisse mit den numerischen Ergebnissen ist in Abbildung 7 dargestellt.



**Abbildung 7:** Vergleich experimentell und numerisch ermittelter Werte für Eigenspannung in tangentialer Richtung (links) an einer Stauchprobe aus 1.3815 und Skizze der Lage der Schnittebene (rechts, 90° gedreht)

### 4.3 Auslegung von Modellprozessen und -werkzeugen

Die in den Zug- und Stauchversuchen aufgenommenen Fließkurven dienen als grundlegende Eingangsdaten für die FE-Simulation, mit deren Hilfe die Prozess- und Werkzeugauslegung für die Modellversuche vorgenommen wurde. In den unterschiedlichen Modellversuchen wurden die druckaufgestickten Stähle P900N sowie P2000 und der wärmebehandelbare Stahl 20MnB4 untersucht. Es wurden insgesamt drei verschiedene Modellversuche mit unterschiedlichen Stoffflussrichtungen (SFR) durchgeführt:

- Voll-Vorwärts-Fließpressen (VVFP), SFR in Stempelbewegungsrichtung,
- Napf-Rückwärts-Fließpressen (NRFP), SFR entgegen der Stempelbewegungsrichtung und
- Kombiniertes Napf-Rückwärts-/Vorwärts-Fließpressen, auch bekannt als Double-Cup-Extrusion Test (DCE-Test) zur Bestimmung des Reibfaktors  $m$ .

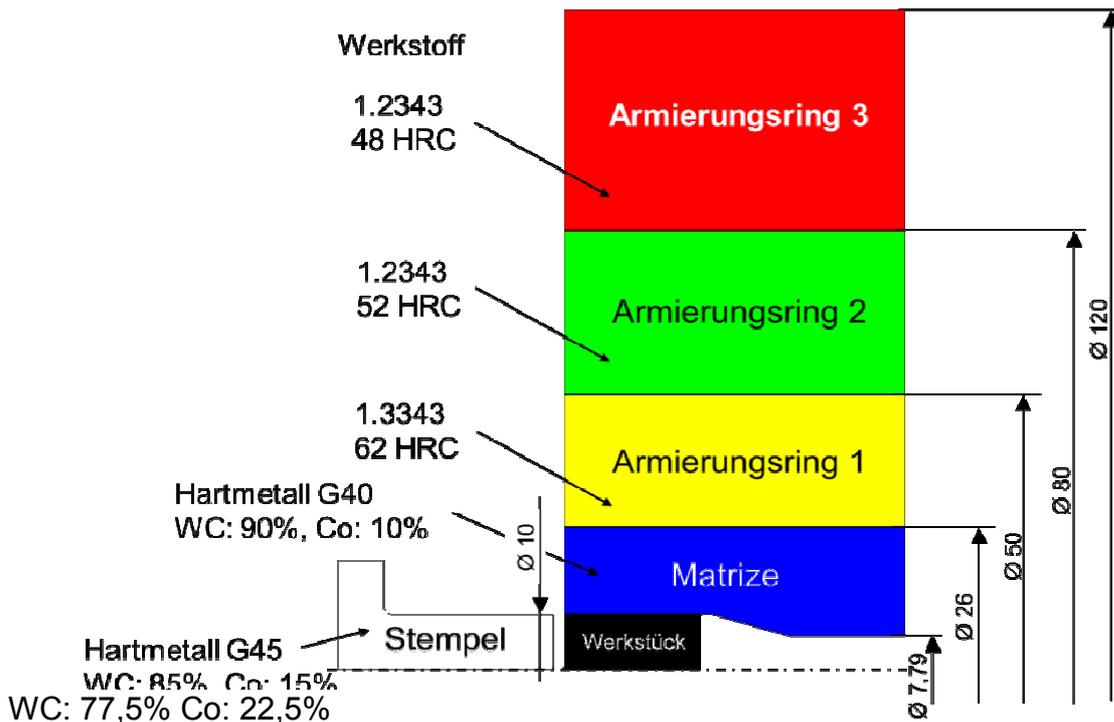
In einem ersten Schritt wurde ein Werkzeug zum VVFP mit einer Matrize und zwei Armierungsringen simulativ untersucht. Hierbei zeigte sich, dass keine Zugdehnungsfreiheit, wie sie für Hartmetalle zur Vermeidung von Ermüdungsbrüchen zwingend notwendig ist, erreicht werden kann. Aus diesem Grund musste eine Optimierung des Werkzeugdesigns durchgeführt werden, um die Vorspannung des Werkzeugs erhöhen zu können und somit eine Verlagerung der Dehnungsamplitude in den Druckbereich zu erreichen. Eine Möglichkeit, um die geforderten Ziele einzuhalten, stellt die Verwendung eines dritten Armierungsringes dar. Jedoch steigt bei der Verwendung eines dritten Armierungsringes die Beanspruchung vor allem an der Innenseite des inneren Armierungsringes, Armierungsring 1, an, sodass hier ein hochfester Werkstoff verwendet werden muss. Die üblicherweise gemäß VDI 3176 für Armierungsringe eingesetzten Werkstoffe weisen keine ausreichende Zugfestigkeit auf, um den auftretenden Beanspruchungen widerstehen zu können. Daher müssen alternative, hochfeste Armierungsringwerkstoffe eingesetzt werden. Hierfür ist die Kenntnis der am inneren Armierungsring auftretenden Beanspruchungen zwingend erforderlich. Die Beanspruchungsanalyse wurde mittels FE-basierter Methoden durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analyse zeigen, dass der innere Armierungsring an der Innen- und Außenseite auf Zug beansprucht wird. Aufgrund dieser ungünstigen Beanspruchung muss der zu wählende Armierungsringwerkstoff eine ausreichende Zähigkeit aufweisen. Weiterhin tritt an der Innenseite des Armierungsringes eine vergleichsweise hohe von Mises-Vergleichsspannung von 2500 MPa auf. Somit muss zusätzlich zur hohen Zähigkeit auch eine hohe Streckgrenze erreichbar sein. Diese Forderung erfüllen in der Regel hochlegierte konventionelle oder pulvermetallurgisch hergestellte Werkzeugstähle. Weiterhin ist der Armierungsring einer hohen Spannungsamplitude unterworfen. Um einem Versagen des Werkstoffs infolge von Ermüdung vorzubeugen, muss der zu wählende Werkstoff eine möglichst hohe Ermüdungsfestigkeit aufweisen. Da die Ermüdungsfestigkeit unter anderem durch die Anzahl der Fehlstellen im Material beeinflusst wird, ist es vorteilhaft, einen Werkstoff zu wählen, welcher eine sehr geringe Fehlstellenzahl aufweist. Aufgrund dieser Anforderungen bietet sich der Einsatz moderner, pulvermetallurgischer Stähle an, da diese einen hohen Reinheitsgrad aufweisen und eine hohe erreichbare Festigkeit bei

gleichzeitiger Zähigkeit. Aufgrund der hier aufgeführten Randbedingungen wurde der innere Armierungsring aus der pulvermetallurgisch hergestellten Variante des Schnellarbeitsstahls 1.3344 (S 6-5-3) hergestellt und auf eine Härte von 62 HRC eingestellt. Diese liegt deutlich unter der Maximalhärte von 66 HRC und stellt somit eine ausreichende Zähigkeit sicher.

Im Vergleich zum Armierungsring 1 treten an den Armierungsringen 2, dem mittleren Ring, und 3, dem äußeren Ring, deutlich geringere Beanspruchungen auf. Aus diesem Grund können diese Ringe aus konventionellen Armierungsringwerkstoffen hergestellt werden. Insbesondere am äußeren Armierungsring liegt eine ausgeprägte Zugbeanspruchung vor. Daher muss hier auf einen besonders zähen Werkstoff zurückgegriffen werden, um ein Reißen des Ringes bei Prozessmaximallast zu vermeiden. Basierend auf diesen Anforderungen werden der mittlere und äußere Armierungsring jeweils aus dem hochlegierten Warmarbeitsstahl 1.2343 (X37CrMoV5-1) angefertigt. Dieser Werkstoff wird unter anderem wegen seiner hohen Zähigkeit in der VDI-Richtlinie VDI 3176 als Armierungsringwerkstoff empfohlen. Da der mittlere Ring eine höhere Beanspruchung erfährt als Armierungsring 3, insbesondere an der Kontaktfläche zu Armierungsring 1, wird dieser auf eine Härte von 52 HRC eingestellt. Der äußere Armierungsring wird zu Erzielung einer ausreichenden Zähigkeit auf 48 HRC gebracht.

Da bereits bei der Betrachtung der Fließkurven druckaufgestickter Stähle eine hohe Werkzeugbeanspruchung erwartet werden kann, wird zu Beginn der Auslegungsphase der Modellwerkzeuge als Matrizenwerkstoff Hartmetall verwendet. Der Fokus bei der Auswahl eines geeigneten Hartmetalls liegt auf Hartmetallen der G-Gruppe. Die so klassifizierten Werkstoffe sind speziell für Anwendungen in der Umformtechnik entwickelt worden. Als Ausgangswerkstoff wird das Hartmetall G40 (WC-Co 19%) angenommen. Dieses weist eine Druckfestigkeit von bis zu 4000 MPa auf. Der E-Modul beträgt 530000 MPa. Der in FE-Analysen ermittelte maximale Innendruck beträgt knapp 3400 MPa. Dieser Wert liegt deutlich unter der maximalen Druckfestigkeit des Hartmetalls G40. Daher kann dieser Werkstoff als Matrizenwerkstoff eingesetzt werden.

Zusätzlich zur Betrachtung der Matrize muss auch der Stempel beim VVFP betrachtet werden, um einen geeigneten Stempelwerkstoff bestimmen zu können. Ebenso wie bei der Auslegung der Matrize wird auch hier auf FE-basierte Verfahren zurückgegriffen. Hierzu wurde im Rahmen der FE-basierten Auslegung der Umformwerkzeuge der Zeitpunkt bestimmt, bei welchem die maximale Stempelbelastung auftrat. Zu diesem Zeitpunkt wurde die Beanspruchung des Stempels, hauptsächlich axiale Druckbelastung, erfasst. Die axiale Spannung im Stempel beträgt etwa 2700 MPa. Aufgrund dieser hohen Belastung wurde als Stempelwerkstoff Hartmetall der Sorte G45 von Böhler (WC-Co 22,5%) mit einer Druckfestigkeit von 3600 MPa eingesetzt. Das gesamte Werkzeugdesign inklusive der Angabe aller nötigen Werkstoffkennwerte ist in Abbildung 8 dargestellt.

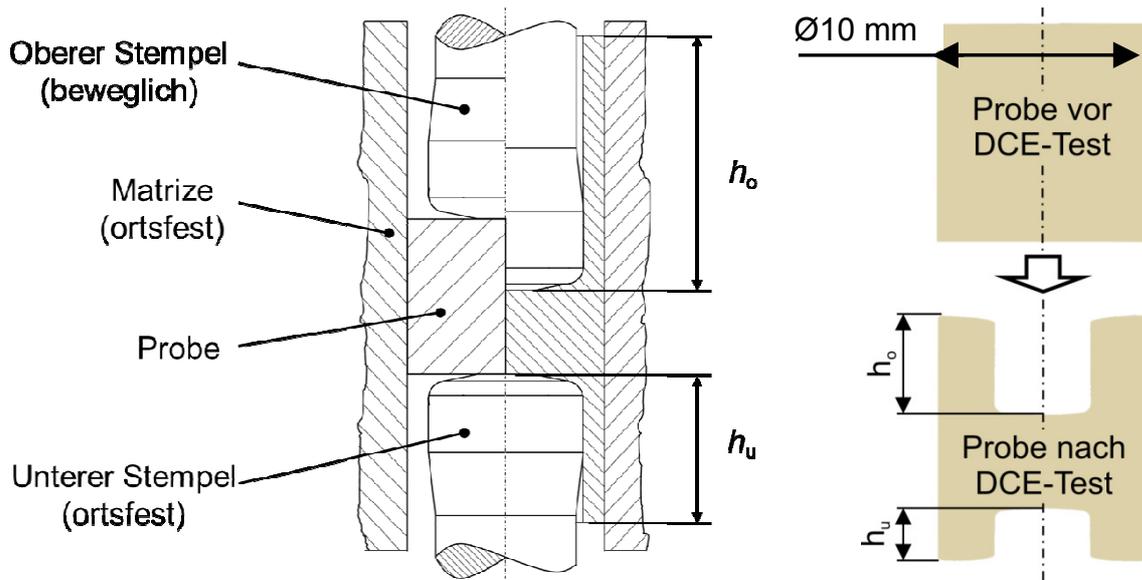


**Abbildung 8:** Skizze eines VVFP-Werkzeugs zur Durchführung von Modellversuchen mit druckaufgestickten Stählen

#### 4.4 DCE-Test und Napf-Rückwärts-Fließpressen

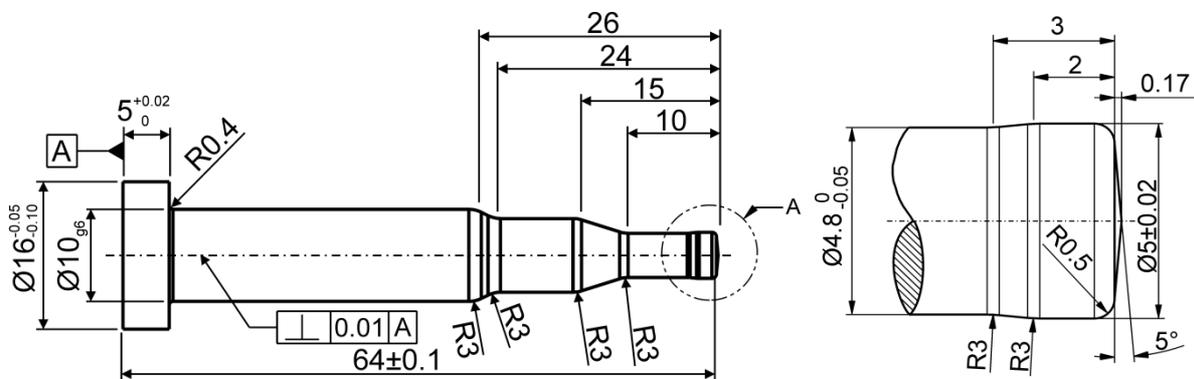
Neben VVFP-Versuchen wurden auch Napf-Rückwärts-Fließpressversuche (NRFP) und Double Cup Extrusion-Tests (DCE-Test) durchgeführt, letzterer speziell zur Untersuchung des Reibverhaltens. Entscheidend für die Qualität der Ergebnisse aus dem DCE-Test ist, dass der Werkstückwerkstoff deutlich über den Fließbund beider geometrisch identischer Stempel hinaus extrudiert wird. Wird diese Forderung vollumfänglich erfüllt, so kann davon ausgegangen werden, dass die Reibungsbedingungen an beiden Stempeln identisch sind. Trifft dies zu, so ist es möglich, diese Reibung zu vernachlässigen. Folglich hat nur noch die Reibung zwischen Matrizenwand und Werkstück einen Einfluss auf die sich oben und unten ausbildenden Näpfe. Eine Prinzipskizze, welche den grundsätzlichen Aufbau des Versuches zeigt, ist in Abbildung 9 dargestellt. Der obere und untere Napf bildet sich in Abhängigkeit der tribologischen Bedingungen zwischen Werkzeug und Werkstück aus und kann daher als charakteristisch für diese angesehen werden. Nach Abschluss des Versuches werden die obere ( $h_o$ ) und untere ( $h_u$ ) Napfhöhe bestimmt und aus diesen beiden Werten das Napfhöhenverhältnis  $r$  gemäß Gleichung 1 berechnet. Mittels numerischer Identifikation kann nachfolgend der Reibfaktor  $m$  ermittelt werden. Dieser Wert stellt eine wichtige Eingangsgröße für die weiteren Simulationen zur Prozess- und Werkzeugauslegung dar.

$$r = \frac{h_o}{h_u} \quad (\text{Gl. 1})$$



**Abbildung 9:** Prinzipskizze des Double-Cup-Extrusion Tests (links), Probengeometrie vor und nach dem Versuch (rechts) [22]

Im Fokus der Werkzeugauslegung standen die beiden geometrisch identischen Stempel, da diese im DCE-Test häufig signifikant höheren Beanspruchungen ausgesetzt sind als die Matrize. Aufgrund der möglichen Spannungsüberhöhung an scharfen Querschnittsänderungen wurde bereits zu Beginn der Auslegung darauf geachtet, dass Querschnittsübergänge möglichst sanft gestaltet werden. Hierzu wurde insbesondere der Übergangswinkel zwischen zwei Querschnitten möglichst flach gewählt. Zusätzlich wurden die Übergänge mit einem Radius versehen, um eine weitere Minimierung der Spannungsüberhöhungen zu erreichen. Weiterhin wurde in Anlehnung an ICFG DOC 6/82 der Stempel mit einer kegelförmigen Fläche und Radien an den Seiten versehen, um den Werkstofffluss zu begünstigen und somit eine Reduzierung der zur Umformung benötigten Stempelkraft zu erreichen. Die im Rahmen der Untersuchung verwendete Stempelgeometrie ist in Abbildung 10 dargestellt. Durch die Verwendung von Radien wird auch gleichzeitig die Reduzierung der Beanspruchung des Stempels erreicht. Bei dieser Beanspruchung handelt es sich vorwiegend um axiale Druckbeanspruchung.



**Abbildung 10:** Stempeldesign der Fließpressstempel zum NRFP und für den DCE-Test (links), Detailzeichnung Stempelkopf (rechts)

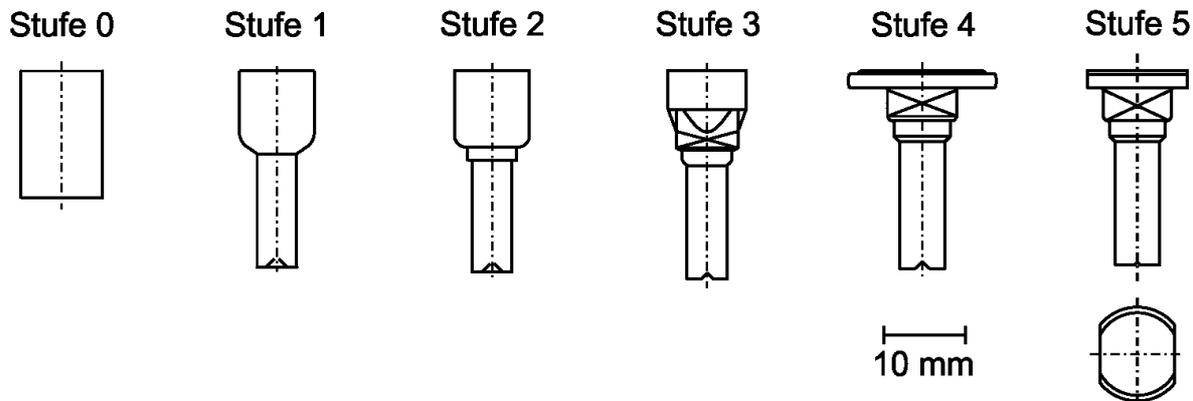
Im Rahmen der FE-basierten Prozessauslegung musste auch ein geeigneter Stempelwerkstoff identifiziert werden. Wie bereits beschrieben werden die im DCE-Test eingesetzten Stempel vorwiegend axial auf Druck beansprucht. Daher wurde in einem ersten Schritt der Ort der maximalen Beanspruchung des Stempels identifiziert. Gemäß den Ergebnissen der FE-Simulation liegt dieser Ort bei der ersten Querschnittsänderung von Durchmesser 4,8 auf 8,5 mm. Die axiale Druckbeanspruchung erreicht an dieser Stelle Werte von bis zu 6800 MPa [22]. Innerhalb der Werkstoffgruppe der Hartmetalle gibt es große Unterschiede hinsichtlich der mechanischen Festigkeit. Zur Herstellung von Umformwerkzeugen werden aktuell überwiegend Hartmetalle mit einem Kobaltgehalt von 20 - 25% eingesetzt. Diese weisen eine Druckbeständigkeit von etwa 3200 bis 4000 MPa bei ausreichender Zähigkeit auf. Als Stempelwerkstoff wurde Hartmetall G10 (WC-Co 6,5%) ausgewählt. Dieses Hartmetall weist einen Kobaltgehalt von 6,5% und eine Druckfestigkeit von 5500 MPa auf. Noch druckfestere Hartmetalle, beispielsweise K01 (WC-Co 3%) mit einer Druckfestigkeit von 6800 MPa, konnten nicht verwendet werden, da hier die Zähigkeit für einen Einsatz als Stempelwerkstoff nicht mehr gegeben ist. Beim Einsatz eines solch spröden Werkstoffs reichen bereits geringste Querkräfte, um ein Versagen /Bruch hervorzurufen. Die Erkenntnisse hinsichtlich der Stempelauslegung beim DCE-Test können auch auf den Napf-Rückwärts-Fließpress-Prozess angewendet werden, da hier sehr ähnliche Gegebenheiten vorliegen. Jedoch können hier tendenziell etwas höhere Stempelbeanspruchungen auftreten. In den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass das Umformen druckaufgestickter Stähle mittels Napf-Fließpressen möglich ist, jedoch nur bis zu begrenzten Umformgraden. Die erreichbaren Umformgrade hängen in starkem Maße von der Werkzeug- und Werkstückgeometrie ab. Da es im DCE-Test nicht möglich ist, die beiden Näpfe bis über die Fließbünde der beiden Stempel hinaus umzuformen und somit die Testergebnisse nicht valide sind, muss ein anderer Test zur Reibungscharakterisierung genutzt werden. Hier bietet sich beispielsweise der so genannten Ringstauchversuch an.

#### **4.5 Werkzeugentwicklung und Auslegung des industrieller Referenzprozesses**

Im Rahmen des industriellen Referenzprozesses wurde ein Rohling für eine Flachrundschaube mit Schlüsselflächen der Größe M6 in insgesamt fünf Stufen hergestellt. In den ersten drei Stufen findet ein Voll-Vorwärts-Fließpressen statt, wobei es sich in den Stufen 1 und 2 um rotationssymmetrische Umformung handelt, wohingegen in Stufe 3 nur noch zyklische Symmetrie vorliegt. Der Schraubenkopf wird in Stufe 4 mittels einer Stauchoperation hergestellt. Dieser Kopf wird in der finalen Stufe 5 mittels Scherschneiden beschnitten und so die notwendige Schlüsselfläche erzeugt. Ein schematischer Stadienplan zur Herstellung der Flachrundschaube ist in Abbildung 11 dargestellt.

Aufgrund des rotationssymmetrischen Charakters der Umformung kann die Prozess- und Werkzeugauslegung in den Stufen 1 und 2 unter Nutzung eines axial-symmetrischen, mechanisch gekoppelten FE-Modells vorgenommen werden. Demgegenüber muss für die Stufen 3 und 4 ein dreidimensionales, mechanisch gekoppeltes FE-Modell zur Prozess- und Werkzeugauslegung genutzt werden. Dies stei-

gert im Vergleich zu axialsymmetrischen Modellen sowohl den Modellierungs-, als auch den Rechenaufwand beträchtlich. In der aktuellen Arbeit werden lediglich die Stufen 1 bis 4 betrachtet.



**Abbildung 11:** Stadienplan des fünfstufigen industriellen Referenzprozesses [23]

Im Rahmen der Recherche möglicher Materialien zur Herstellung von Aktivelementen wurden folgende Werkstoffe, als grundsätzlich geeignet identifiziert:

- legierte Kaltarbeitsstähle,
- Schnellarbeitsstähle (HSS),
- Hartmetalle und
- technische Keramiken.

Hinsichtlich des Beanspruchungskollektivs muss bei den Aktivelementen eines Werkzeugs zwischen Stempel und Matrizen unterschieden werden. Die Matrizen sind mit hoher Wahrscheinlichkeit komplexen und extremen Beanspruchungen während des Prozesses ausgesetzt. Daher scheidet hier der Einsatz legierter Kaltarbeitsstähle und HSS als Matrizenwerkstoff aus, da diese Werkstoffe eine zu geringe Beanspruchbarkeit aufweisen. Technische Keramiken sind ebenfalls ungeeignet, da sie eine signifikant höhere Sprödigkeit als Hartmetalle aufweisen und daher noch anfälliger für Versagen aufgrund schlagartiger Beanspruchung und Ermüdung sind. Somit stellen Hartmetalle eine vielversprechende Alternative als Matrizenwerkstoffe dar, da sie eine höhere Zähigkeit als technische Keramiken aufweisen und eine höhere Beanspruchbarkeit als legierte Kaltarbeitsstähle oder HSS.

Im Gegensatz zu den Matrizen werden Stempel im Wesentlichen axial auf Druck beansprucht. Aus diesem Grund kommt hier neben Hartmetall auch der Einsatz von HSS in Betracht, sofern dies die auftretende Beanspruchung zulässt. Die Möglichkeit zum Einsatz von HSS ist darauf zurückzuführen, dass diese in den meisten Fällen eine höhere Druckfestigkeit als legierte Werkzeugstähle aufweisen. Werden jedoch aufgrund einer hohen Werkzeugbeanspruchung besonders hochfeste HSS-Sorten benötigt, so kann auf pulvermetallurgisch (PM) hergestellte Sorten zurückgegriffen werden. Diese Sorten weisen aufgrund ihres teilweise höheren Gehalts an Legierungselementen gegenüber schmelzmetallurgisch hergestellten HSS eine nochmals gesteigerte Druckfestigkeit, sowie aufgrund ihrer hohen Reinheit auch eine bessere Ermüdungsfestigkeit auf.

Neben den Aktivelementen hat auch das Armierungssystem einen entscheidenden Einfluss auf die Werkzeuglebensdauer. Mit Hilfe des Armierungssystems soll der Beanspruchungszustand der Matrize in den Druckspannungs- beziehungsweise Druckdehnungsbereich verlagert werden. Nur dadurch kann die Gefahr von Gewalt- und insbesondere Ermüdungsbrüchen spröder, hochfester Werkzeugwerkstoffe, wie im vorliegenden Fall gefordert, minimiert werden. Während der Kaltmassivumformung druckaufgestickter Stähle treten hohe Innendrucke auf, welche zu einer großen Zugbeanspruchung des Aktivelements führen. Aus diesem Grund musste ein geeignetes Armierungssystem entwickelt werden, welche die dadurch hervorgerufene Zugbeanspruchung zuverlässig minimiert. Zur Entwicklung eines hochbeanspruchbaren Armierungssystems wurden FE-basierte Untersuchungen durchgeführt, da es aufgrund der hohen Beanspruchung des Aktivelements auch zu einer hohen Beanspruchung des Armierungssystems kommt und nur so sichergestellt werden kann, dass alle relevanten Beanspruchungen mit hoher Genauigkeit berücksichtigt werden können. So tritt beispielsweise an der Kontaktfläche zwischen Matrize und Armierungsring eine von-Mises-Vergleichsspannung von über 2700 MPa auf. Die konventionellen, in der VDI-Richtlinie VDI 3176 genannten Werkstoffe für Armierungsringe, unter anderem 1.2343, konnten hier nicht verwendet werden, da deren maximale Druckfestigkeit mit 1700 MPa deutlich niedriger als die auftretenden Beanspruchung liegt. Daher mussten im Rahmen der Forschungsarbeiten alternative, innovative Armierungsringwerkstoffe identifiziert werden. Um dieses Ziel zu erreichen, mussten jedoch die Rahmenbedingungen, zum Beispiel Einbaumaße, des Einsatzes der Ringe geklärt werden. Die Ergebnisse der FE-basierten Untersuchungen zeigen, dass der innere Armierungsring an der Außenseite bei Prozessmaximallast auf Zug beansprucht wird. Am unbelasteten Werkzeugsystem befindet sich die Außenseite des Rings minimal unter Druckbeanspruchung. Um die Gefahr einer Werkstoffermüdung zu verringern, wurden pulvermetallurgisch hergestellte Werkstoffe eingesetzt, da diese eine hohe Reinheit und weniger Fehlstellen aufweisen, welche rissinitiierend wirken können.

Für eine eventuelle Beschichtung von Aktivelementen aus Hartmetall können sowohl PVD- als auch CVD-Schichten verwendet werden. Bei der Schichtauswahl sollte jedoch beachtet werden, dass die Schicht, um einen signifikanten Zugewinn an Verschleißfestigkeit zu erzielen, deutlich härter sein sollte, als der Substratwerkstoff. Das zum Beispiel zur Herstellung der Matrize in Stufe 1 verwendete Hartmetall weist eine Härte von etwa 2000 HV auf. Eine mittels PVD aufgebrachte Titan-Nitrid-Schicht (TiN) besitzt lediglich eine Härte von etwa 2200 HV auf. Dies entspricht einer Steigerung von 10%. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Applikation einer Titancarbid-Schicht (TiC) mittels CVD. Diese zeigt eine Härte von circa 3500 HV auf, was deutlich höher liegt als die des Substratwerkstoffs. Eine charakteristische Eigenschaft dieser Schicht ist jedoch deren hohe Sprödigkeit. Die Problematik der Schichthärte und die Tatsache, dass Hartmetalle, insbesondere die im Rahmen des Projekts verwendeten hochfesten Sorten, deutlich weniger zu abrasivem Verschleiß neigen, wird in einem ersten Schritt auf die Beschichtung von Aktivelementen verzichtet.

## 4.6 Werkzeugherstellung

Bei der Bearbeitung der Werkzeugwerkstoffe wurde, soweit möglich, auf eine funkenerosive Bearbeitung verzichtet, um die Beanspruchbarkeit der Hartmetalle und Stähle nicht zu reduzieren. Stattdessen werden alle relevanten Geometrielemente mittels spanender Verfahren, beispielsweise Drehen, Fräsen, Schleifen, etc. hergestellt. Die Hartmetallmatrizen werden abschließend poliert, sodass sich eine Oberflächenrauigkeit von  $R_a < 0,1 \mu\text{m}$  einstellt. Dies ist notwendig, um Kerbwirkungen an der Werkzeugoberfläche zu minimieren [24].

Aufgrund der hohen nötigen Vorspannung zur Realisierung hochbeanspruchbarer Werkzeuge werden die Trennfugen der Armierungsringe und der Matrize kegelig ausgeführt. Dies bietet den Vorteil einer einfacheren Montage bei gleichzeitig reduziertem Abrieb zwischen den einzelnen Komponenten sowie ein höheres realisierbares Übermaß. Während des Einpressens wird zur Minimierung der Reibung Molybdändisulfid ( $\text{MoS}_2$ ) verwendet. Durch die Verminderung der Reibung kann die Einglättung der Oberfläche der einzelnen Werkzeugbestandteile herabgesetzt werden. Dadurch wird einem Vorspannungsverlust entgegengewirkt, was sich grundsätzlich positiv auf die Standmenge der Werkzeuge auswirken wird.

Weiterhin wurde während der Forschungsarbeiten ein spezielles Verfahren zur Montage und Demontage des Armierungsverbandes entwickelt. Zentrales Problem hierbei war die Tatsache, dass es während des Montage- und / oder Demontagevorgangs des Armierungssystems zu einem Versagen einzelner Armierungsringe kommen kann. Durch ein geeignetes Vorgehen bei der Montage, welches sich jedoch von der Demontage unterscheidet, kann verhindert werden, dass Versagen einzelner Armierungsringe oder des gesamten Armierungsverbundes auftritt. Dies ist wichtig, da diese hochbeanspruchbaren Armierungsverbände sehr kostenintensiv sind und somit auf eine möglichst häufige Weiter- beziehungsweise Wiederverwendbarkeit geachtet werden muss.

## 4.7 Ergebnisse der industriellen Fertigungsversuche

Im Vorfeld der industriellen Fertigungsversuche musste die verwendete Pressmaschine SP460 von SACMA, welche eine Maximalkraft von 2000 kN aufbringen kann, eingerichtet werden. Hierzu wurden die entsprechenden Werkzeuge eingebaut und etwa 10.000 Teile aus dem konventionellen Vergütungsstahl 1.5525 (20MnB4) hergestellt. Auch bei diesen Versuchen wurde der für die Umformung druckaufgestickter Stähle genutzte Schmierstoff DIONOL St-V 1260 bereits verwendet. Durch die Einstellung der Maschine unter Verwendung eines Stahls mit signifikant geringerer Festigkeit als druckaufgestickte Stähle kann vermieden werden, dass die Werkzeuge bereits während des Einstellvorgangs durch die hohen Beanspruchungen bei der Verwendung druckaufgestickter Stähle vorgeschädigt werden. Im Rahmen der Feineinstellung der Maschine wurde beispielsweise der Öffnungs- und Schließzeitpunkt der Greifereinheit justiert.

Im Rahmen der Fertigungsversuche zeigte sich, dass insbesondere die Werkzeuge der Stufen 1 und 4 häufiger versagen als Werkzeuge anderer Stufen. Bei den Werkzeugen der Stufen 2 und 3 konnten im Rahmen der Fertigungsversuche keine Werkzeugausfälle, weder durch Verschleiß noch durch Ermüdungs- bzw. Ge-

waltbruch, beobachtet werden. In Abbildung 12 ist die Stadienfolge des industriellen Referenzbauteils dargestellt. Die dort gezeigten Bauteile wurden aus dem druckaufgestickten Stahl 1.3815 hergestellt und zeigen, dass die Kaltmassivumformung druckaufgestickter Stähle möglich ist. Insbesondere am Schaft der Bauteile ist durch die bläuliche Färbung ersichtlich, dass es hier zu einer sehr starken Erwärmung des Bauteils infolge Reibung und verrichteter und in Wärme umgesetzter Umformarbeit kommt.



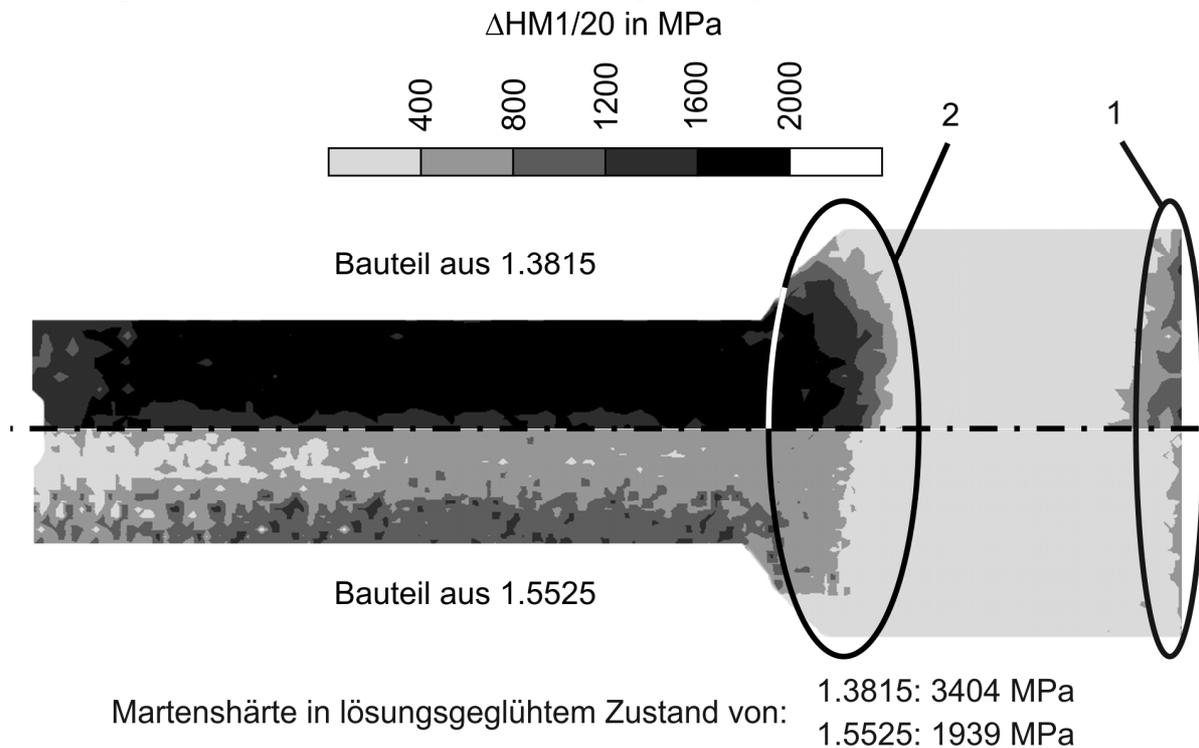
**Abbildung 12:** Bauteile aus 1.3815 der Stadienfolge des industriellen Referenzprozesses

Aufgrund der hohen Umformkräfte, welche bei der Kaltumformung druckaufgestickter Stähle auftreten, kommt es zu einer deutlich stärkeren Auffederung der Presse als bei der Verwendung von 1.5525. Dies wirkt sich direkt auf die ausgeformte Schaftlänge des Bauteils aus. Die Differenz der Schaftlänge zwischen einem Bauteil aus dem Vergütungsstahl 1.5525 und einem Bauteil aus dem druckaufgestickten Stahl 1.3815 beträgt 2,7 mm, wenn lediglich Bauteile in Stufe 1 produziert werden. Daher muss bei der Umstellung einer weggebundenen Maschine auf druckaufgestickte Stähle als Werkstückwerkstoff eine Nachjustierung des unteren Totpunkts erfolgen, um Bauteile mit anforderungsgerechten Maßen zu erhalten. Werden weitere Stufen hinzugeschaltet, ist damit zu rechnen, dass die Abweichung noch größer wird, da die Presse sukzessive mehr Kraft aufbringen muss.

Mit den für die industriellen Fertigungsversuche eingesetzten Werkzeugen konnten Standmengen bis zu 1500 Teilen erreicht werden. Als besonders kritische Stufen konnten die Stufen 1 und 4 identifiziert werden. Vor allem in diesen Stufen trat Werkzeugversagen durch Verschleiß beziehungsweise Bruch auf. Demgegenüber kam es in den Stufen 0, 2 und 3 zu keinem Ausfall während der Versuche. Ebenso trat bei diesen Stufen kein derart hoher Verschleiß auf, dass das Werkzeug hätte gewechselt werden müssen.

Da die Bauteileigenschaften einen wesentlich Einfluss auf die möglichen Einsatzgebiete haben, wurden im Anschluss an die Serienfertigungsversuche die Bauteileigenschaften charakterisiert. Hierzu wurden Martenshärtemessungen durchgeführt. Hierbei standen insbesondere Bauteile aus Stufe 1 im Fokus der Untersuchungen, da in dieser Stufe sehr hohe Umformgrade im Bauteil erreicht werden. Durch die Ermittlung der Verteilung der Martenshärte ist es zusätzlich möglich, die

zur Werkzeugauslegung verwendeten FE-Modelle hinsichtlich der Abbildung des Stoffflusses zu validieren. Die Martenshärtemessungen wurden auf einem FischerscopeHM2000 XYp der Firma Helmut Fischer GmbH (Sindelfingen) durchgeführt. Die Prüfkraft von 1000 mN wurde in 20 Sekunden aufgebracht. Die Reduzierung der Prüfkraft fand ebenfalls innerhalb von 20 Sekunden statt. Um die Martenshärteverteilung bestimmen zu können, wurde ein Raster aus Messpunkten mit einem Abstand von etwa 0,35 mm definiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchung, in diesem Fall die Änderung der Martenshärte, sind in Abbildung 13 dargestellt.



**Abbildung 13:** Vergleich Verteilung der Martenshärteänderung in Bauteil aus 1.3815 und 1.5525 [25]

Durch die Auftragung der Änderung der Martenshärte kann gezeigt werden, dass durch die hohe Kaltverfestigung druckaufgestickter Stähle signifikant höhere Härteniveaus erreicht werden können als bei Verwendung konventioneller Stähle. Insbesondere ein Vergleich der Härteänderung im Schaft des Bauteils verdeutlicht für 1.3815 großflächige Werte bis zu 2000 MPa, wohingegen für 1.5525 nur sehr vereinzelt Werte bis zu 1600 MPa erreicht werden. Für Zone 2 kann dies ebenfalls beobachtet werden. Zudem reicht hier die Verfestigung weiter in den Kopfbereich hinein. Diese hohe Härteänderung kann als Indikator dafür gesehen werden, dass auch die Festigkeit entsprechend erhöht ist. In der mit 1 markierten Zone in Abbildung 13 ist zu erkennen, dass es aufgrund des Abscherens und der anschließenden Einglättung der Scherfläche infolge der Beanspruchung durch den Fließpresstempel zu einer deutlichen Änderung der Martenshärte beim Bauteil aus 1.3815 kommt. Diese Änderung tritt bei 1.5525 nahezu nicht auf.

#### **4.8 Empfehlungen zur Prozess- und Werkzeugauslegung für die Kaltmasivumformung druckaufgestickter Stähle**

Die Ergebnisse aus den durchgeführten Experimenten zeigen, dass druckaufgestickte Stähle über ein sehr hohes Formänderungsvermögen verfügen. Auch beim Auftreten sehr hoher Umformgrade, wie unter anderem in Stufe 4 des industriellen Serienprozesses, konnten keine makroskopischen Risse oder Oberflächendefekte festgestellt werden, was als vorteilhaft angesehen werden kann. Es kann somit festgestellt werden, dass druckaufgestickte Stähle neben einer hohen Kaltverfestigung auch ein hohes Formänderungsvermögen aufweisen. Aufgrund der hohen Kaltverfestigung sind jedoch für die Umformung hochbeanspruchbare Werkzeuge notwendig. Die Aktivelemente dieser Werkzeuge sollten in den überwiegenden Fällen aus besonders druckfesten Hartmetallsorten, beispielsweise G10 (WC-Co 6,5%) oder G20 (WC-Co 12%), hergestellt werden, um den auftretenden Beanspruchungen widerstehen zu können. Die Armierungsringe müssen aus Werkstoffen hoher Festigkeit und Zähigkeit angefertigt werden. Hierfür bieten sich insbesondere für den inneren und mittleren Armierungsring pulvermetallurgisch hergestellte Schnellarbeitsstähle, zum Beispiel S590, oder Warmarbeitsstähle, unter anderem CPM1V, an. Der äußere Armierungsring kann aus konventionell erschmolzenem Warmarbeitsstahl, beispielsweise 1.2343, hergestellt werden. Treten hier jedoch besonders hohe Spannungsamplituden während des Umformvorgangs auf, so ist der Einsatz eines hochreinen Werkstoffs, beispielsweise hergestellt mittels Elektro-Schlacke-Umschmelzen (ESU) als sinnvoll zu erachten. Um die während der Umformung auftretenden Beanspruchungen zu senken, muss ein geeigneter Schmierstoff verwendet werden. Dieser Schmierstoff sollte eine hohe Viskosität und Druckbeständigkeit aufweisen, um möglichst lange eine gute Schmierwirkung gewährleisten zu können. Ein Beispiel für einen solchen Schmierstoff stellt das Fließpressöl DIONOL St-V 1260, hergestellt von der MKU-Chemie GmbH, dar.

Bauteile aus druckaufgestickten Stählen weisen im Vergleich zu Komponenten aus konventionellen Werkstoffen eine signifikant höhere Festigkeit auf. Hierbei kann davon ausgegangen werden, dass diese für Bauteile aus druckaufgestickten Stählen etwa doppelt so hoch liegt wie für Bauteile aus konventionellen Stählen. Durch die weiteren positiven Eigenschaften druckaufgestickter Stähle, unter anderem hohe Korrosions- und Spannungsrisskorrosionsbeständigkeit, Amagnetismus, hervorragende Zähigkeit, etc., können Bauteile hergestellt werden, welche ein außergewöhnliches Eigenschaftsspektrum aufweisen. Durch diese Eigenschaften können Bauteile aus druckaufgestickten Stählen in besonderen Anwendungsfeldern, zum Beispiel Luftfahrt, eingesetzt werden, wo teilweise nur Kleinserien von Bauteilen benötigt werden. Bei einer Weiterentwicklung der Werkzeugtechnik, sodass auch sehr hohe Standmengen von mehr als 100000 erreicht werden können, ist es jedoch auch möglich, hochfeste Bauteile aus druckaufgestickten Stählen in Standardanwendungen, beispielsweise Fahrzeugbau, einzusetzen.

## 5 Fazit und Ausblick

Im Rahmen des Forschungsprojekts konnte gezeigt werden, dass es bei einer beanspruchungsgerechten Auslegung der Umformwerkzeuge möglich ist, Hochleistungsbauteile aus druckaufgestickten Stählen mittels Kaltmassivumformung herzustellen. Die aus druckaufgestickten Stählen hergestellten Bauteile weisen im Vergleich zu Bauteilen aus konventionellen wärmebehandelbaren Stahlwerkstoffen eine signifikant höhere Festigkeit auf. Aufgrund dieser besonderen Eigenschaften eignen sich Bauteile aus druckaufgestickten Stählen für einen Einsatz in vielen Bereichen. Im Rahmen der Untersuchungen konnte ebenso ein Werkzeugdesign entwickelt werden, welches in der Lage ist, auch sehr hohen Beanspruchungen zu widerstehen. Ebenso konnten alternative Armierungsringwerkstoffe identifiziert werden, welche es erlauben, diese hochbeanspruchbaren Werkzeugsysteme zu realisieren.

Für zukünftige Arbeiten sind verschiedene Richtungen denkbar. Zum einen kann untersucht werden, in welchem Verhältnis die Festigkeit von Bauteilen aus druckaufgestickten Stählen zu vergüteten Bauteilen steht. Zum anderen ist es möglich, die Zähigkeit von vergüteten Bauteilen mit Bauteilen aus druckaufgestickten Stählen zu vergleichen und so Aufschlüsse darüber zu erhalten, ob bei Bauteilen aus druckaufgestickten Stählen eine ausreichende Restzähigkeit vorliegt.

## 6 Danksagung

Die in diesem Bericht dargestellten Forschungsergebnisse wurden während des Forschungsprojektes „Hochleistungsbauteile durch Kaltmassivumformung hochfester, druckaufgestickter Stähle“ (KumDruS) erzielt. Dieses Projekt wurde durch Mittel des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenprogramms „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert. Die Betreuung wurde durch den Projektträger Karlsruhe (Karlsruher Institut für Technologie (KIT)) vorgenommen. Die Projektpartner bedanken sich beim Geldgeber und dem Betreuer.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] Winterkorn, M., Ludanek, H., Rohde-Brandenburger, K.: CO<sub>2</sub>-Reduzierungspotenziale durch Leichtbau in der Automobilentwicklung, Innovationsquelle Leichtbau - Vorreiter bei der Energieeinsparung, Dresdner Leichtbausymposium 2008
- [2] N. N.: Webpräsenz der Energietechnik Essen GmbH: <http://www.energietechnik-essen.de/de/produkte/stickstoffstaehle.html> (aufgerufen am 08.08.2012)
- [3] Luo, H.; Fang, X.; Wang, R-Z.; et. al.: Characteristics of Dynamic Recrystallization during Hot Deformation for High Nitrogen Stainless Steels. In: Proceedings of the International Conference on Recrystallization and Grain Growth, 2012
- [4] Saller, G.; Spiradek-Hahn, K.; Scheu, C.; Clemens, H.: Microstructural evolution of Cr-Mn-N austenitic steels during cold work hardening. In: Materials

- Science and Engineering, Part A (Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing) Band 427 (2006) Heft 1-2, S. 246-254
- [5] Panfilova, L. M.; Smirnov, L. A.; Mitchell, P. S.: The unique features of reinforcing steel microalloyed with nitrogen and vanadium. In: Materials Science Forum, FBP R \* Band 500/501 (2005) S. 511-518
- [6] Samantaray, D.; Mandal, S.; Albert, S.K.; et. al.: Thermally Activated Deformation of a High-Nitrogen Grade 316LN Stainless Steel under Compressive Loading. In: Proceedings of the International Conference on Advances in Metallic Materials and Manufacturing Processes for Strategic Sectors, 2012
- [7] Heubner, U.: High-alloyed corrosion resistant steels for the chemical process industry, power engineering and marine technology - past and future. Materials and Corrosion Band 53 (2002) Heft 10, S. 756-764
- [8] ICFG-Dokument: Small Quantity Production in Cold Forging. International Cold Forging Group (ICFG), Doc. 7/88. Bamberg: Meisenbach-Verlag, 1992, S. 83-91
- [9] Noack, P.: Rechnerunterstützte Arbeitsplanerstellung und Kostenberechnung beim Kaltmassivumformen von Stahl. Bericht aus dem Institut für Umformtechnik, Universität Stuttgart, Nr. 97. Berlin. Springer, 1987
- [10] Jesner, G.; Marsoner, S.; Schemmel, I.; Haeussler, K.; Ebner, R.; Pippan, R.: Damage mechanisms in materials for cold forging dies under loading conditions typical for dies. Proceedings of the Tool06, 7th International Tooling Conference, Tooling Materials and Their Applications from Research to Market, Vol. 1, Torino, IT, May 2-5, 2006, p. 29-36
- [11] Gronbaek, J.; Hinsel, C.: The importance of optimized prestressing with regard to the tool performance in precision forging. In: Kuzman. K. (edtr.): ICIT 2001, 3<sup>rd</sup> International Conference on Industrial Tools, (2001) pp. 41-48
- [12] Groenbaek, J.; Hinsel, C.; Bisgaard, A.: Towards optimized fatigue life of precision forging dies by stripwound containers. 10th International ColdForgingCongress 2000, Fellbach. VDI-Berichte \* Band 1555 (2000) S. 193-209, Düsseldorf: VDI-Verlag Sep, 2000
- [13] Popp, U.: Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg. Bamberg: Meisenbach 2003
- [14] DIN ISO 286-1: ISO-System für Grenzmaße und Passungen; Grundlagen für Toleranzen, Abmaße und Passungen
- [15] Arbak, M.; Putz, A.; Engel, U.; Geiger, M.: Industrial Ceramics in Cold Forging: Increasing Dimensional Accuracy and Surface Quality. In: Proceedings of the 4th JSTP International Seminar on Precision Forging, Nara, Japan, 2006, S.83-86
- [16] Völkl, R.; Schafstall, H.: FEM-gestützte Beanspruchungsanalyse - Erhöhung der Lebensdauer von Kaltmassiv-Umformwerkzeugen. In: Umformtechnik 1/2004, Meisenbach-Verlag, Bamberg, 2004

- [17] Meidert, M.: Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg. Bamberg: Meisenbach 2006
- [18] Falk, B.: Simulationsbasierte Lebensdauervorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung. Dissertation, Universität Erlangen-Nürnberg. Meisenbach, Bamberg, 2000
- [19] Lange, K.: Umformtechnik – Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Band 2: Massivumformung. Berlin Heidelberg New York Tokio: Springer-Verlag. 1984, 2. Auflage
- [20] Noneder, J.; Merklein, M.; Engel, U.: Vergleich verschiedener Verfahren zur Fließkurvenaufnahme im Hinblick auf die Prozess- und Werkzeugauslegung bei der Kaltmassivumformung druckaufgestickter Stähle. In: R. Kawalla (Hrsg.): ProceedingsAutoMetFORM / SFU 2010, (2010), Freiberg, S. 333-345
- [21] Wildau, M.; Labudde, T.; Bleck, W.: Untersuchung des Verfestigungsverhaltens metastabiler austenitischer nichtrostender Edelstähle. In: Pohl, M. (Hrsg.): Konstruktion, Werkstoffentwicklung und Schadensanalyse. Düsseldorf, Verlag Stahleisen GmbH, 2010
- [22] Noneder, J.; Engel, U.; Merklein, M.: Tool design for cold forging of high nitrogen steels. In: Liewald, M. (Hrsg.): Proceedings of the 12<sup>th</sup> International Cold Forging Congress, (2011), Stuttgart: Institute for Metal Forming Technology, S. 9-13
- [23] Merklein, M.; Engel, U.; Noneder, J.; Reiß, A.: FE-basierte Prozess- und Werkzeugauslegung zur Herstellung von Hochleistungsbauteilen mit dem Ziel einer gezielten Einstellung von Bauteileigenschaften. In: Schafstall, H.; Wohlmuth, M. (Hrsg.): Tagungsband 13. RoundTable - Simulation in der Umformtechnik, (2012), Bamberg: Meisenbach Verlag, S. 291-302
- [24] N.N.: VDI-Richtlinie 3186 Blatt 2: Werkstoffe für Kaltfließpresswerkzeuge - Anleitung zur Gestaltung, Bearbeitung und Eigenschaftsverbesserung. 1997
- [25] Noneder, J.; Merklein, M.; Engel, U.: On the evaluation of strength of cold forged components made of high nitrogen steel. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Steels in Cars and Trucks, (2011), Düsseldorf: VerlagStahleisen GmbH, S. 58-65

Korrespondierender Autor: Dipl.-Ing. Johannes Noneder  
 Lehrstuhl für Fertigungstechnologie  
 Universität Erlangen-Nürnberg  
 Egerlandstr. 11-13  
 D-91058 Erlangen  
 h.noneder@ift.uni-erlangen.de