



FAU Studien aus dem Maschinenbau 435

Clara-Maria Kuball

Grundlegende Untersuchungen
zur umformtechnischen Herstellung
von Halbhohlstanznieten aus
hochverfestigenden Werkstoffen

Clara-Maria Kuball

Grundlegende Untersuchungen zur umformtechnischen Herstellung
von Halbhohlstanzen aus hochverfestigenden Werkstoffen

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 435

Herausgeber/-innen:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Clara-Maria Kuball

Grundlegende Untersuchungen zur umformtechnischen Herstellung von Halbhohlstanznieten aus hochverfestigenden Werkstoffen

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT)
Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Erlangen
FAU University Press
2024

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Kontakt: Clara-Maria Kuball, <https://orcid.org/0000-0002-3637-5838>

Bitte zitieren als

Kuball, Clara-Maria. 2024. *Grundlegende Untersuchungen zur umformtechnischen Herstellung von Halbhohlstanzen aus hochverfestigenden Werkstoffen*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 435. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-718-0.

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.
Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren.
Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über OPEN FAU der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://open.fau.de/home>

Verlag und Auslieferung:
FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-717-3 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-718-0 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-718-0

**Grundlegende Untersuchungen zur
umformtechnischen Herstellung von Halbhohlstanz-
nieten aus hochverfestigenden Werkstoffen**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Clara-Maria Kuball, M.Sc.

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen

Prüfung: 07.11.2023

Gutachter/in: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Prof. Dr.-Ing. Hans Christian Schmale, Technische Universität Dresden

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Wesentliche Erkenntnisse dieser Arbeit wurden im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsprojekts „Vergütungsfreie Herstellung und Fügen von Stanznietelementen mit angepasstem mechanischen Eigenschaftsprofil aus hochverfestigenden Werkstoffen und prozesskettenübergreifender numerischer Abbildung“ erarbeitet.

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein, der Ordinaria des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie, für die wissenschaftliche Betreuung der Arbeit und das entgegengebrachte Vertrauen. Hierdurch konnte ich mich in den vergangenen Jahren nicht nur fachlich, sondern auch persönlich weiterentwickeln, wofür ich sehr dankbar bin. Darüber hinaus danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Christian Schmale und Herrn Prof. Dr. Bastian Etzold für die Übernahme der Gutachten. Ein weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut, dem Ordinarius des Laboratoriums für Werkstoff- und Fügetechnik der Universität Paderborn, und meinem Projektpartner Benedikt Uhe für die langjährige, angenehme Zusammenarbeit und den bereichernden fachlichen Austausch. Ein besonderer Dank gilt außerdem Herrn PD Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Univ. Michael Lechner für die fachlichen Diskussionen und seine wertvolle Unterstützung bei der Anfertigung dieser Arbeit.

Des Weiteren möchte ich mich bei der MKU-Chemie GmbH für die Bereitstellung des Hochleistungsfließpressöls Dionol® ST V 1260 im Rahmen des genannten Forschungsvorhabens bedanken.

Besonders herzlich möchte ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie bedanken. Die fachliche Unterstützung sowie insbesondere der freundschaftliche Umgang miteinander und das gegenseitige Vertrauen haben maßgeblich dazu beigetragen, dass diese Arbeit überhaupt entstanden ist.

Schließlich danke ich aus tiefstem Herzen meiner Familie. Durch ihre bedingungslose Unterstützung, ihr umfassendes Verständnis und besonders durch ihre Liebe hat sie mir diesen Weg überhaupt erst ermöglicht.

Erlangen, im November 2023

Clara-Maria Kuball

Inhaltsverzeichnis

	Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	vii
1	Einleitung	1
2	Stand der Technik und Forschung	3
2.1	Mischbauweise mittels Füge-technik	3
2.2	Halbhohlstanznieten	4
2.2.1	Grundlagen des Halbhohlstanznietens	4
2.2.2	Fügbareit von Materialkombinationen.....	6
2.2.3	Einflussfaktoren auf die Verbindungsausbildung	8
2.3	Massivumformung hochstickstofflegierter Stähle	12
2.3.1	Stickstoff als Legierungselement	13
2.3.2	Einflussfaktoren auf die mechanischen Eigenschaften und das Umformverhalten.....	15
2.3.3	Umformtechnische Herstellung von Bauteilen aus hochstickstofflegierten Stählen	18
2.4	Zusammenfassende Bewertung	20
3	Zielsetzung und methodisches Vorgehen.....	23
4	Werkstoffe, experimentelle Untersuchungen und Methoden	27
4.1	Untersuchte Werkstoffe	27
4.2	Werkstoffcharakterisierung	28
4.2.1	Zylinderstauchversuch	29
4.2.2	Ringstauchversuch.....	31
4.3	Anlage zur experimentellen Nietherstellung	34
4.4	Methoden zur Analyse des Nietherstellprozesses	34
4.4.1	Analytische Methoden.....	34
4.4.2	Numerische Simulation.....	35
4.5	Untersuchung der umgeformten Bauteile.....	36
4.5.1	Härtemessungen	37
4.5.2	Optische 3D Messungen.....	39
4.5.3	Energiedispersive Röntgenspektroskopie.....	39

5	Auslegung des Nietherstellprozesses	41
5.1	Grundlegende Anforderungen an Nitelemente	41
5.2	Charakterisierung der eingesetzten Nietwerkstoffe.....	45
5.3	Erarbeitung eines numerischen Modells und eines Versuchsaufbaus	56
5.3.1	Definition von Anforderungen an den Umformprozess und den Versuchsaufbau	56
5.3.2	Numerisches Modell.....	58
5.3.3	Numerisch gestützte Auslegung	60
5.3.4	Werkzeugaufbau und Versuchsdurchführung	62
5.3.5	Experimentelle Validierung des numerischen Modells.....	64
5.4	Zusammenfassende Bewertung	67
6	Analyse der Einflüsse auf den Umformprozess und die Bauteileigenschaften.....	69
6.1	Identifikation von Einflussgrößen	69
6.2	Grundlegende Untersuchungen zum Temperatureinfluss.....	73
6.3	Analyse prozessseitiger Einflussgrößen.....	86
6.3.1	Umformtemperatur bei konstantem Stempelweg	86
6.3.2	Umformtemperatur und Temperaturkombinationen bei vergleichbarer Bauteilgeometrie	97
6.3.3	Restbodendicke der Näpfe nach Stufe 1	105
6.3.4	Geometrische Schwankungen der Rohlinge	115
6.4	Analyse werkstoffseitiger Einflussgrößen	126
6.5	Zusammenhänge zwischen prozessseitigen und werkstoffseitigen Einflussgrößen	133
6.6	Zusammenfassende Bewertung	144
7	Einsatzverhalten der Nitelemente	149
8	Zusammenfassung und Ausblick	153
9	Summary and outlook	157
	Literaturverzeichnis	161

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
d	mm	Durchmesser
h	mm	Höhe
k_f	MPa	Fließspannung
l	mm	Länge
m	-	Reibfaktor
n	-	Verfestigungsexponent
n_v	-	Anzahl der Versuche
s	mm	Umformweg
v	mm/min	Geschwindigkeit
A	mm ²	Querschnitt
C	kN/mm	Steifigkeit
E	MPa	Elastizitätsmodul
F	kN	Kraft
R_m	MPa	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	MPa	Fließgrenze
s_s	mm	Stempelweg
T	°C	Temperatur
V	mm ³	Volumen
α	K ⁻¹	Wärmeausdehnungskoeffizient
ε	-	Dehnung
σ	MPa	Spannung
φ	-	Umformgrad

<i>Abkürzung</i>	<i>Beschreibung</i>
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
CAD	Computer Aided Design
DCE	Double-Cup-Extrusion

<i>Abkürzung</i>	<i>Beschreibung</i>
DESU	Druck-Elektroschlacke-Umschmelzen
EDX	Energy dispersive X-ray spectroscopy
Exp.	Experimentell
FE	Finite Elemente
FEM	Finite-Elemente-Methode
NRFP	Napf-Rückwärts-Fließpressen
Num.	Numerisch
REM	Rasterelektronenmikroskop
RT	Raumtemperatur
S 1	Umformstufe 1
S 2	Umformstufe 2
T	Temperatur

1 Einleitung

Der Klimawandel bedeutet für Gesellschaft, Politik, Wissenschaft und Wirtschaft eine der größten Herausforderungen unserer Zeit. Zur Bekämpfung des Klimawandels wurde das verbindliche Ziel des Erreichens der Klimaneutralität innerhalb der Europäischen Union bis zum Jahr 2050 im Europäischen Klimagesetz verankert, wobei bereits bis zum Jahr 2030 die Reduktion der Nettotreibhausgasemissionen um 55 % im Vergleich zum Jahr 1990 als Klimazwischenziel angestrebt wird [1]. Der Transportsektor ist für beinahe ein Viertel der europäischen Treibhausgasemissionen verantwortlich [2]. Dementsprechend wurden innerhalb der Europäischen Union neue Anforderungen im Bereich der emissionsfreien und emissionsarmen Fahrzeuge definiert. Ab 2030 soll eine Reduzierung der durchschnittlichen Emissionen erreicht werden, wobei ein EU-weiter Flottenzielwert für neu zugelassene Personenkraftfahrzeuge entsprechend einer Verringerung des Ziels für das Jahr 2021 um 37,5 % und für neue leichte Nutzfahrzeuge um 31 % gilt [3]. Für neue schwere Nutzfahrzeuge sollen die spezifischen CO₂-Emissionen ab 2030 um 30 % im Vergleich zum Referenzzeitraum in den Jahren 2019 bis 2020 verringert werden [4]. Mit möglichen CO₂-Emissionsüberschreitungen sind für die Hersteller entsprechende Abgaben verbunden [3], wodurch der Kostendruck zunimmt.

Da die Mobilität ein unverzichtbarer Bestandteil unserer globalisierten Gesellschaft und Wirtschaft geworden ist, bedarf es innovativer Ansätze, um diese Mobilität auch in den kommenden Jahrzehnten sicherzustellen. Aus diesem Grund nimmt die Relevanz von Leichtbauansätzen zur Verringerung des Fahrzeuggewichts und damit des Treibstoffverbrauchs und der Emissionen weiterhin zu. Der Fokus bei der Ermittlung von Potentialen zur Emissionsreduzierung sollte allerdings nicht nur auf den hergestellten Produkten liegen, sondern auch die Fertigungsprozesse selbst sollten in Betracht gezogen werden.

Bei der Herstellung kaltmassivumgeformter Bauteile beispielsweise ergibt sich das Potential zur Etablierung ressourceneffizienterer Prozessketten, indem energieintensive Wärmebehandlungsschritte vermieden werden [5]. Im Zusammenhang mit der Realisierung von Leichtbaukonzepten kommt mechanischen Fügeverfahren wie dem Halbhohlstanzen eine große Bedeutung zu, da die Kombination artungleicher Werkstoffe mittels mechanischem Fügen ermöglicht wird. Allerdings bestehen beim Halbhohlstanzen im Hinblick auf den Nietherstellprozess Herausforderungen in ökonomischer und ökologischer Hinsicht, da die Nietherstellung eine energie-

und kostenintensive sowie zeitaufwendige Prozesskette darstellt. Nach der Kaltumformung ist üblicherweise das Vergüten und das Beschichten der Nietelemente erforderlich, um eine ausreichende Festigkeit, Duktilität und Korrosionsbeständigkeit zu gewährleisten [6]. Ein neuartiger Ansatz in diesem Kontext ist die Verwendung hochverfestigender Werkstoffe, wie zum Beispiel hochstickstofflegierter Stähle, als Nietwerkstoff, sodass die dem Umformen nachgelagerten Prozessschritte Vergüten und Beschichten nicht mehr notwendig sind und somit Ressourceneinsparungen durch eine Verkürzung der gesamten Prozesskette erreicht werden. Da das Vergüten der umgeformten Niete entfällt, weisen die Niete nicht wie üblich homogene Eigenschaften, sondern eine umformbedingte Gradierung der Eigenschaften auf. Demzufolge besteht die Möglichkeit, die lokalen mechanischen Nieteigenschaften entsprechend den Anforderungen im Fügeprozess einzustellen. Dieses Potential wurde bislang nicht genutzt. Um aus der Gradierung der Eigenschaften Vorteile ziehen zu können, bedarf es eines umfassenden Prozessverständnisses für die Umformung von Nieten aus hochverfestigenden Werkstoffen.

Das Ziel im Rahmen der vorliegenden Arbeit ist daher die Erarbeitung eines grundlegenden Prozessverständnisses für die umformtechnische Herstellung von Halbhohlstanznieten unter Nutzung hochverfestigender Werkstoffe als Nietwerkstoff. Hierdurch wird die Grundlage für die Produktion von Nieten mit maßgeschneiderten, gezielt beeinflussten gradierten Eigenschaften in der Zukunft gelegt. Den Ausgangspunkt zur Erreichung eines umfassenden Prozessverständnisses bildet die Identifikation sowohl prozesseitiger als auch werkstoffseitiger Einflussgrößen. Für eine ganzheitliche Untersuchung werden nicht nur Einflüsse auf die mechanischen Nieteigenschaften berücksichtigt, sondern auch Einflüsse auf den Umformprozess sowie geometrische Merkmale der Niete, welche im Zusammenhang mit der beim Umformen erreichten Formfüllung stehen, einbezogen. Dabei trägt die numerische Analyse des Nietherstellprozesses in Ergänzung zu den durchgeführten experimentellen Untersuchungen zu einem tiefergehenden Prozessverständnis bei und ermöglicht darüber hinaus die Bewertung der Einflüsse auf die Werkzeugbeanspruchung beim Umformen. Auf Basis der Untersuchungen werden Zusammenhänge zwischen prozess- und werkstoffseitigen Einflussgrößen sowie Prozessgrenzen abgeleitet. Die im Rahmen dieser Arbeit erzielten Erkenntnisse stellen somit eine relevante Basis für den zukünftigen Einsatz von hochverfestigenden Nietwerkstoffen und die Steigerung der Effizienz und der Ressourcenschonung beim Halbhohlstanznieten dar.

2 Stand der Technik und Forschung

In diesem Kapitel werden grundlegende Kenntnisse dargestellt, welche für die Untersuchungen zum Umformen von Halbhohlstanznieten aus hochverfestigenden Werkstoffen im Rahmen der vorliegenden Arbeit erforderlich sind. Zu Beginn wird auf die Bedeutung von Mischbauweisen mittels mechanischer Füge Technologien und im Speziellen auf das Halbhohlstanznieten eingegangen. Da die Verwendung hochverfestigender Nietwerkstoffe bei dieser Arbeit im Fokus steht, werden grundlegende Kenntnisse zu hochstickstofflegierten Stählen sowie Einflussfaktoren auf die mechanischen Eigenschaften aufgezeigt. Ebenfalls adressiert wird die Massivumformung von Bauteilen aus hochstickstofflegierten Stählen. Anhand der zusammenfassenden Bewertung erfolgt abschließend die Ableitung des Forschungsbedarfs für diese Arbeit.

2.1 Mischbauweise mittels Füge Technik

Die Erfüllung gesetzlicher Vorgaben zur Emissionsreduzierung vor dem Hintergrund des Umweltschutzes in Verbindung mit steigenden Anforderungen hinsichtlich der Variantenvielfalt von Produkten stellt die Automobilindustrie vor große Herausforderungen und führt zu erhöhtem Kostendruck [7]. Dieses Spannungsfeld wird noch erweitert durch die hohen Anforderungen an die Crashesicherheit der Fahrzeuge. Aus diesem Grund haben Leichtbauansätze in den vergangenen Jahren an Bedeutung gewonnen. Durch eine Verringerung des Fahrzeuggewichts kann eine Reduzierung des Treibstoffverbrauchs und der Schadstoffemissionen erreicht werden. Bei einer Gewichtsreduktion um 10 kg und einer Verringerung des Treibstoffverbrauchs um 0,51 l pro 100 km können demnach die CO₂-Emissionen um 12 g/km reduziert werden [8]. Etwa 40 % des Fahrzeuggesamtgewichts lassen sich auf die Karosserie zurückführen und zudem hat der Anstieg des Karosseriegewichts die Gewichtszunahme in weiteren Bereichen zur Folge, da beispielsweise Fahrwerk und Motor entsprechend stärker und größer ausgelegt werden müssen, weshalb die Gewichtsreduktion der Karosserie besonders einflussreich ist [9]. Der Einsatz von Mischbauweisen ermöglicht durch die Kombination unterschiedlicher Werkstoffe, wie beispielsweise hochfester Stähle und Aluminiumlegierungen, die Reduzierung des Fahrzeuggewichts bei gleichzeitiger Erfüllung der Sicherheitsanforderungen. In der Fahrzeugkarosserie werden zunehmend hochfeste Stähle eingesetzt und hierdurch bislang übliche Festigkeitsklassen im

Bereich von 440 MPa bis 590 MPa substituiert [10]. Herausforderungen für Fügeverfahren ergeben sich nicht nur in Bezug auf die zunehmenden Festigkeiten der Werkstoffe, sondern auch aufgrund der unterschiedlichen Schmelztemperaturen artungleicher Werkstoffe, wodurch thermische Fügeverfahren ihre Grenzen erreichen [11]. Im Gegensatz dazu ermöglichen mechanische Fügeverfahren die Kombination artungleicher Werkstoffe. Folglich werden mechanische Fügeverfahren heutzutage häufig für die Herstellung von Fügeverbindungen im Bereich der Fahrzeugkarosserie eingesetzt [6]. Zu den bedeutendsten mechanischen Fügeverfahren zählen das Clinchen und Nietverfahren wie das Voll- und Halbhohlstanznieten [12].

2.2 Halbhohlstanznieten

Das Halbhohlstanznieten ist ein etabliertes und weit verbreitetes mechanisches Fügeverfahren. Die Entwicklung dieses Verfahrens reicht bis in die 1960er Jahre zurück, hat jedoch in den vergangenen Jahren im Zusammenhang mit dem Trend hin zu Mischbauweisen zunehmend an Bedeutung gewonnen [13]. Entsprechend DIN 8593-5 ist das Stanznieten definiert als das „Fügen durch Einspreizen eines Hilfsfügeteils“, wobei Halbhohl- oder Vollstanzniete als Hilfsfügeteile dienen können [14]. Das Verfahren wird gemäß DIN 8580 der Hauptgruppe 4 Fügen und der Gruppe 4.5 Fügen durch Umformen zugeordnet [15].

2.2.1 Grundlagen des Halbhohlstanznietens

Beim Halbhohlstanznieten werden zwei oder mehrere Bleche mithilfe eines Niets kraft- und formschlüssig gefügt. Der Fügeprozess ist durch vier aufeinanderfolgende Schritte charakterisiert, welche in Bild 1 neben den üblichen Bezeichnungen am Niet und den charakteristischen Verbindungskennwerten dargestellt sind. Nach dem Fixieren der Fügepartner durchschneidet der Niet das stempelseitige Fügeteil, weshalb kein Vorlochen notwendig ist. Im Anschluss an das Durchschneiden kommt es zum Aufspreizen und Stauchen des Niets, wobei das matrizenseitige Blech umgeformt wird. Durch das Aufspreizen des Niets und während des weiteren Stauchvorgangs wird der Hinterschnitt ausgebildet. Dieser stellt einen besonders wichtigen Verbindungskennwert dar, der für die Beurteilung der Verbindungsqualität herangezogen wird, da er einen wesentlichen Einfluss auf die Verbindungsfestigkeit hat [13]. Die Restbodendicke des matrizenseitigen Fügeteils spielt unter anderem für die Korrosionsbeständigkeit der Fügeverbindung eine Rolle und die Nietkopfendlage ist relevant im Hinblick auf das Erreichen einer glatten und ästhetischen Oberfläche [13].

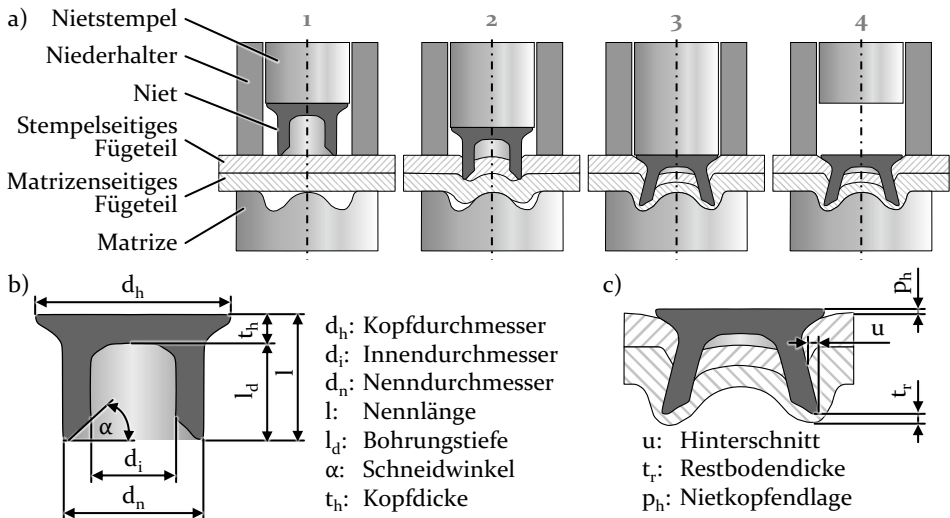


Bild 1: Halbhohlstanznieten nach [16]: a) Schematischer Prozessablauf, b) Bezeichnungen am Niet und c) Verbindungskennwerte

Ein Vorteil gegenüber thermischen Fügeverfahren ist das Ausbleiben temperaturbedingter Effekte [17], während beim Schweißen die Ausbildung einer Wärmeeinflusszone zur lokalen Reduzierung der Zugfestigkeit des Blechwerkstoffs führen kann, was vor dem Hintergrund der hohen Sicherheitsanforderungen kritisch sein kann [18]. Salamati et al. [19] legen anhand unterschiedlicher Untersuchungen dar, dass das Halbhohlstanznieten hinsichtlich der erreichbaren Verbindungsfestigkeit eine konkurrenzfähige Alternative zum weit verbreiteten Widerstandspunktschweißen ist. Neben weiteren Vorteilen, wie beispielsweise den hohen Taktzeiten, ergeben sich andererseits Nachteile, welche zum Beispiel die erforderliche Zugänglichkeit von zwei Seiten und die hohen Prozesskräfte betreffen [20]. Atzeni et al. [21] stellten fest, dass die erforderliche Fügekraft beim Spreizen und vor allem beim Stauchen des oberen Blechs durch den Nietkopf erheblich ansteigt. Nichtsdestotrotz hat das Verfahren eine große Bedeutung für die Realisierung von Stoffleichtbaukonzepten.

Die Herstellung von Halbhohlstanznieten besteht aus mehreren Prozessschritten. Halbhohlstanzniete werden üblicherweise aus Draht kaltgeschlagen und anschließend vergütet [6]. Die nachgelagerte Wärmebehandlung ist ausschlaggebend für den hohen Energiebedarf der Nietherstellprozesskette. Gemäß [22] sind 40 % der im industriellen Umfeld in Deutschland genutzten Energie Wärmebehandlungsprozessen zuzuordnen. Diese Angabe wird untermauert durch die Untersuchungen von Mendikoa et al.

[23], welche bei der Analyse des Energieverbrauchs eines spanischen Gießereiunternehmens feststellten, dass mehr als ein Drittel des Gasverbrauchs für Energieaufwendungen der Firma auf Wärmebehandlungen entfallen. Dementsprechend stellt auch bei der Nietherstellung die Wärmebehandlung eine Hauptursache dafür dar, dass die Prozesskette sehr energieintensiv ist. Die Wärmebehandlung der Niete ist allerdings zwingend erforderlich, da durch das Vergüten eine ausreichende Festigkeit und gleichzeitig Duktilität sichergestellt wird. Es sind Niete unterschiedlicher Härteklassen verfügbar, wobei die Niethärte meist zwischen 400 HV und 530 HV im vergüteten Zustand liegt [24]. Häufig verwendete Niete der Härteklasse H4 weisen eine Härte von $480 \text{ HV} \pm 30 \text{ HV}$ auf [25]. Im Anschluss an die Wärmebehandlung werden die Niete beschichtet, um eine gute Korrosionsbeständigkeit zu erreichen und um außerdem die Reibung zwischen Niet und zu fügenden Blechen zu reduzieren [6].

An den Nietwerkstoff werden zwei grundlegende Anforderungen gestellt. Einerseits muss der Nietwerkstoff mit Hinblick auf den für die Hinterschnittausbildung notwendigen Spreizvorgang über eine gewisse Duktilität verfügen, andererseits muss er eine ausreichende Festigkeit aufweisen, damit beim Fügen kein Ausknicken oder keine übermäßige Stauchung des Nietschafts auftritt [26]. Obgleich Halbhohlstanzniete herkömmlicherweise aus hochfesten borlegierten Stählen hergestellt werden [24], existieren auch Ansätze bezüglich des Einsatzes anderer Nietwerkstoffe. Abe et al. [27] nutzten aus einer Aluminiumlegierung der 6000er Serie gefertigte Niete zum Fügen einer Aluminiumlegierung der 5000er Serie, wobei das dadurch vereinfachte Recycling im Vordergrund stand. In [28] wurde ein Stanzniet aus Edelstahl patentiert. Darüber hinaus wurde der Einsatz von rostfreiem, austenitischem Edelstahl als Nietwerkstoff von Hahn et al. [29] untersucht. Durch die Verwendung von rostfreien Edelstählen ergibt sich das Potential, die lange Prozesskette bei der Nietherstellung zu verkürzen, da auf das Beschichten zur Sicherstellung der Korrosionsbeständigkeit verzichtet werden kann. Allerdings besteht das Risiko, dass die Niete keine ausreichende Festigkeit für das Fügen hochfester Stähle aufweisen.

2.2.2 Fügbarkeit von Materialkombinationen

Das Halbhohlstanznieten eignet sich zum Fügen eines breiten Spektrums an Werkstoffen, wozu neben metallischen Werkstoffen beispielsweise auch Kunststoffe zählen. Ein entscheidender Vorteil des Verfahrens liegt darin, dass es zum Fügen unterschiedlicher Kombinationen aus artungleichen Werkstoffen eingesetzt werden kann. In den vergangenen Jahren wurden

zahlreiche Untersuchungen zur Fügbarkeit verschiedener Werkstoffe durchgeführt. So können unter anderem Kombinationen aus Aluminiumlegierungen mit unlegierten Stählen [30], mit hochfesten Stählen [31] und mit Kupferlegierungen [32] gefügt werden. Auch für die Verbindung von Aluminium- und Magnesiumbasislegierungen kann das Halbhohlstanznieten eingesetzt werden [33]. Die Möglichkeit zur Herstellung von Stanznietverbindungen aus Aluminiumlegierungen und Titan wurde von He et al. [34] gezeigt. Verschiedene Ansätze zur Reduzierung des Risikos des Auftretens von Rissen beim Fügen wenig duktiler Aluminium-Druckgusslegierungen wurden von Jäckel et al. [35] zusammengefasst. Darüber hinaus ist das Halbhohlstanznieten von Aluminiumlegierungen und Kunststoffen realisierbar [36]. Die prinzipielle Eignung des Halbhohlstanznietens für das Fügen von glasfaserverstärkten Verbundwerkstoffen und Aluminiumlegierungen konnte von Fratini et al. [37] nachgewiesen werden. Allerdings stellen Meschut et al. [38] fest, dass das Fügen faserverstärkter Kunststoffe mittels Stanznietverfahren in der Regel eine Schädigung der Fasern im Fügeprozess zur Folge hat. Zudem kann Nietbauchen auftreten und die Hinterschnittausbildung unzureichend sein, was bei der Verbindungsauslegung berücksichtigt werden muss [39].

Vor dem Hintergrund der weiter zunehmenden Relevanz von Leichtbaustrategien kommt im Speziellen dem Fügen von Aluminiumlegierungen mit hochfestem Stahl eine große Bedeutung zu [24]. Um den bestehenden Bedarf hinsichtlich der Gewichtseinsparung zur Emissionsreduzierung bei gleichzeitig steigenden Anforderungen an die Insassensicherheit bei der Fahrzeugentwicklung zu erfüllen, ist der Einsatz der genannten Materialkombination ein Schlüsselfaktor. Aufgrund der sehr unterschiedlichen Schmelztemperaturen von Stählen und Aluminiumlegierungen stoßen Schweißverfahren beim Fügen derartiger Materialkombinationen im Gegensatz zu mechanischen Fügeverfahren an ihre Grenzen [30]. Allerdings bestehen auch beim mechanischen Fügen artungleicher Werkstoffe nach wie vor Herausforderungen. Der sich ergebende Unterschied hinsichtlich der Festigkeit des stempel- und des matrizenseitigen Blechs hat einen großen Einfluss auf die Fügbarkeit [40]. Wenn die Festigkeit des Niets die Festigkeit der zu fügenden Bleche nur geringfügig überschreitet, besteht das Risiko, dass Fehler wie eine übermäßige Stauchung des Nietschafts auftreten [13]. Weitere typische Fehler sind das Ausknicken und das Auftreten von Brüchen im Bereich des Nietschafts [31]. Zudem ist beim Fügen hochfester Stähle das Aufspreizen erschwert [41], was vor allem beim matrizenseitigen Einsatz von hochfestem Stahl zu einer unzureichenden Hinterschnittausbildung führen kann [24]. Vor diesem Hintergrund existieren

zahlreiche Untersuchungen in Bezug auf Einflussfaktoren auf die Verbindungsbildung, welche sich letztlich auf die erreichbare Verbindungsfestigkeit auswirkt.

2.2.3 Einflussfaktoren auf die Verbindungsbildung

Anhand einer numerischen Analyse konnten Cacko et al. [42] zeigen, dass die mechanischen Eigenschaften der zu fügenden Blechwerkstoffe bei Verwendung desselben Typs von Niet einen großen Einfluss auf die Verbindungsbildung haben. Gleichzeitig führen bereits geringe Unterschiede der mechanischen Eigenschaften von Nieten zu einer veränderten Verbindungsbildung bei derselben Materialkombination [42]. Grundsätzlich können Einflussfaktoren und dementsprechende Ansätze zur Beeinflussung der Verbindungsbildung auf den Fügeprozess und auf den verwendeten Niet bezogen werden.

Fügeprozess

Entscheidende Einflussfaktoren auf die grundlegende Fügbarkeit sind die Festigkeit und die Festigkeitsunterschiede der zu fügenden Bleche. Je größer der Festigkeitsunterschied zwischen oberem und unterem Blech ist, desto schwieriger ist die erfolgreiche Herstellung einer Stanznietverbindung umsetzbar [24]. Abe et al. [43] erbrachten den Nachweis der Eignung des Halbhohlstanznietens mit konventionellen Nieten und einer handelsüblichen Fügematrize für das Fügen von Aluminiumlegierungen und Stahl mit einer Zugfestigkeit von bis zu 590 MPa. Dabei spielt die stempelseitige und matrizen­seitige Anordnung der Bleche eine Rolle. Vor allem beim matrizen­seitigen Einsatz des Stahls wurde mit zunehmender Festigkeit des Stahls eine Verringerung des Hinterschnitts festgestellt [43]. Mittels einer Adaption des Fügeprozesses erreichten Lou et al. [44] beim Fügen von AA6061-T6 und DP780 durch das Applizieren von elektrischem Strom eine verbesserte Hinterschnittausbildung. Bei diesem Verfahren werden nicht nur das Gefüge und die lokale Härte der Fügepartner, sondern auch des Niets beeinflusst [45]. Eine Steigerung der Verbindungsqualität wurde auch bei dem von Jiang et al. [46] adaptierten Verfahren, dem Halbhohlstanznieten mit Unterstützung durch ein elektromagnetisches System und dem darauf basierenden Fügen unter Hochgeschwindigkeit, erzielt. Im Zuge dessen werden eine Vergrößerung des Hinterschnitts und eine Erhöhung der Härte im Nietschaft erreicht [47]. Ein weiterer Ansatz zur Erweiterung der Prozessgrenzen hinsichtlich der Fügbarkeit hochfester Werkstoffe ist die lokale Wärmebehandlung der Bleche im Bereich des Fügepunkts,

wodurch die Festigkeit reduziert und die Duktilität gesteigert wird und somit das Fügen des pressgehärteten Stahls 22MnB5 mittels konventioneller Niete auch auf der Matrizen­seite ermöglicht wird, wie es von Meschut et al. [48] aufgezeigt wurde.

Des Weiteren hat die verwendete Fügematrize einen Einfluss auf die Verbindungsqualität und –festigkeit, wie anhand von Untersuchungen in [49] dargelegt wurde. Die Matrize beeinflusst das Aufspreizen des Niets beim Fügen [13]. Entsprechend der Analyse in [50] stellen der Durchmesser und die Tiefe der Matrize die Haupteinflussfaktoren dar. Die Wahl einer geeigneten Matrize ist abhängig von den zu fügenden Blechwerkstoffen. Während beim Fügen einer stempelseitigen Aluminium­legierung mit matrizen­seitigem hochfestem Stahl eine Dornmatrize eingesetzt wird, ist beim stempelseitigen Einsatz von hochfestem Stahl eine Flachmatrize geeignet [25]. Es existieren unterschiedliche Konzepte zur Adaption von Fügematrizen, um die Verbindungsausbildung zu verbessern und Prozessgrenzen zu erweitern. Drossel und Jäckel [51] gelang durch ein neuartiges Konzept mit geteilter Matrize einschließlich beweglichem Matrizenboden die Herstellung rissfreier Fügeverbindungen mit wenig duktilen Aluminium-Druckgusslegierungen. In [31] konnten durch die Anpassung der Matrizen­geometrie erfolgreich Fügeverbindungen mit stempelseitigem Stahl mit einer Zugfestigkeit von 980 MPa hergestellt werden, während in [43] bei der Nutzung einer handelsüblichen Matrize aufgrund des Stauchens des Nietschafts das Durchschneiden des oberen Stahlblechs nicht möglich war. Dieser Ansatz wurde in [52] für den Einsatz von drei zu fügenden Blechen erweitert. Auch in diesem Fall hatte die Anordnung der Fügepartner einen Einfluss auf die resultierende Verbindungsausbildung [53].

Weitere Einflussfaktoren im Fügeprozess, welche sich auf die Verbindungsausbildung und die erzielte Verbindungsfestigkeit auswirken, sind beispielsweise die Fügeschwindigkeit [54], die Anordnung der Niete in Bezug auf den Abstand zum Blechrand [55], die Beschichtung der zu fügenden Bleche [56] sowie die Beschichtung der Niete [57], wodurch die tribologischen Bedingungen beim Fügen beeinflusst werden. Ebenso hat die Blechdicke einen Einfluss, da mit zunehmender Blechdicke des stempelseitigen Blechs das Risiko des Stauchens und schließlich auch des Ausknickens und Auftretens eines Bruchs des Nietschafts steigt [31].

Niet

Bezüglich der Niete lassen sich grundsätzlich die Nietgeometrie und die mechanischen Nieteigenschaften als Haupteinflussfaktoren auf die Verbindungsausbildung unterscheiden. Die Entscheidung, welche Nietgeometrie

verwendet wird, hängt vor allem von der spezifischen Fügeaufgabe ab, wobei unter anderem die Nennlänge von Bedeutung ist. Die Wahl der Nennlänge ist grundsätzlich abhängig von der Blechdicke der Fügepartner [13]. Allerdings wurde von Sun [58] beim Fügen von AA5182-O mit DP600 durch ein Erhöhen der Nennlänge von 6,0 mm auf 6,5 mm eine verbesserte Verbindungsausbildung und Verbindungsfestigkeit erreicht, wobei die Kreuzkopfgzugfestigkeit sogar um 45 % gesteigert wurde. Bei der Anpassung der Nennlänge muss dennoch der Einfluss auf die Restbodendicke berücksichtigt werden. Anhand einer numerischen Analyse wurde von Kappe et al. [59] dargelegt, dass eine Vergrößerung der Nennlänge zwar zu einem verbesserten Aufspreizen und damit einem vergrößerten Hinterschnitt führt, aber dass dadurch gleichzeitig die Restbodendicke verringert werden kann. Darüber hinaus besteht bei einem zu langem Nietschaft das Risiko des Ausknickens oder einer übermäßigen Stauchung [60]. Die Wahl der Nennlänge ist besonders beim matrizenseitigem Einsatz von hochfestem Stahl entscheidend, da bei einer zu geringen Nennlänge das Aufspreizen erschwert ist, während bei einer zu großen Nennlänge das Risiko des Auftretens eines Bruchs im matrizenseitigen Blech besteht [43]. Neben der Nennlänge spielt auch der Nietdurchmesser eine Rolle, da bei einem geringeren Außendurchmesser eine verringerte Verbindungsfestigkeit zu erwarten ist [13]. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Nietfußgeometrie. Li et al. [61] führten Setzversuche zum Fügen von AA5754 durch, wobei sowohl Niete mit stumpfem Nietfuß als auch Niete mit spitzem Nietfuß zum Einsatz kamen. Dabei wurde ersichtlich, dass durch die Verwendung von Nieten mit spitzem Nietfuß der Hinterschnitt beim Fügen der Aluminiumlegierung vergrößert werden kann [61]. Des Weiteren hat der Winkel der Nietschneide einen Einfluss während des Fügeprozesses. Durch einen zu großen Winkel kann das Schneiden des stempelseitigen Blechs erschwert sein, während ein zu kleiner Winkel zu einem verringerten Aufspreizen führen kann [60]. Auf Basis der Einflussfaktoren in Verbindung mit der Nietgeometrie ergeben sich verschiedene Ansätze, um die Prozessgrenzen hinsichtlich der Fügbarkeit zu erweitern und die Verbindungsausbildung insbesondere beim Fügen hochfester Stähle zu verbessern. Eine adaptierte Nietgeometrie speziell für das Fügen hochfester Stähle wurde von Philipskötter et al. [62] patentiert. In [63] wurde eine neuartige Nietgeometrie vorgestellt, bei welcher der Nietschaft an mehreren Stellen unterbrochen ist, wodurch das Aufspreizen begünstigt werden soll. Bei der Entwicklung des RIVSET® HDX Niets der Firma Böllhoff wurden unter anderem die Geometrie der Nietschneide modifiziert und die Niethärte erhöht, um das Fügen von stempelseitigem pressgehärtetem Stahl zu ermöglichen [64]. Im Speziellen beim Fügen hochfester Stähle ist die Wahl der Nietgeometrie entscheidend, um

den Schneidvorgang und das Aufspreizverhalten so zu beeinflussen, dass ein ausreichender Hinterschnitt erzielt wird [65]. Dies gilt vor allem dann, wenn verschiedene Kombinationen hinsichtlich der Anordnung des hochfesten Stahls gefügt werden sollen. In [25] wurde gezeigt, dass sich Fügeverbindungen, bestehend aus der Aluminiumlegierung EN AW-5083 und dem hochfesten Stahl HCT780X mit unterschiedlicher Anordnung der Bleche, nicht mittels desselben Typs handelsüblicher Niete herstellen lassen. Aus den Untersuchungen in [25] geht hervor, dass ein konventioneller P-Niet für das Fügen von stempelseitigem EN AW-5083 mit matrizenseitigem HCT780X nicht geeignet ist, aber für die Verbindung von beidseitig eingesetztem HCT780X verwendet werden kann, wobei allerdings das Risiko des Auftretens von Rissen im Übergangsbereich zwischen Nietschaft und Nietkopf besteht. Die Steifigkeit eines konventionellen HD2-Niets ist hingegen nicht ausreichend für das Fügen von beidseitigem HCT780X, weshalb der Niet stark gestaucht wird, statt den stempelseitigen Stahl zu durchschneiden [25].

Neben der Nietgeometrie sind auch die mechanischen Eigenschaften der Niete entscheidend für die Verbindungsausbildung. Anhand einer numerischen Analyse des Fügeprozesses unter Verwendung unterschiedlicher Materialmodelle für den Nietwerkstoff wurde von Mucha [66] gezeigt, dass die Fließgrenze und das Verfestigungsverhalten des Nietwerkstoffs einen Einfluss auf die Verbindungsausbildung haben. Mit steigender Fließgrenze des Nietwerkstoffs im Verhältnis zur Fließgrenze des Blechwerkstoffs wurden eine Zunahme des Hinterschnitts und eine Verringerung der Restboddicke festgestellt, was auf die Erhöhung der Steifigkeit des Niets und deren Einfluss auf die Deformation des matrizenseitigen Blechs zurückgeführt wurde [66]. Zudem resultierte ein erhöhter Verfestigungsexponent des Nietwerkstoffs in einem verstärkten Aufspreizen [66]. Vornehmlich beim Fügen hochfester Stähle spielt die Niethärte eine wichtige Rolle für die Fügbarkeit. Der Ansatz, in diesem Fall eine hohe Niethärte zu wählen, wäre zwar prinzipiell zielführend, steht allerdings oftmals in Verbindung mit einer verringerten Duktilität, welche für den Spreizvorgang essentiell ist. Die Bedeutung dieses Zusammenhangs wird anhand der Untersuchungen von van Hall et al. [67] deutlich, in deren Rahmen der Einfluss der Niethärte beim Fügen des hochfesten Stahls USIBOR 1500 mit einer Aluminiumlegierung der 6000er Serie analysiert wurde. Bei der Verwendung von Nieten mit Härtewerten unterhalb von 550 HV kam es zum Ausknicken des Nietschafts, während durch den Einsatz von Nieten mit einer höheren Härte zwar das Ausknicken verhindert werden konnte, aber infolge der geringeren Duktilität Risse im Niet auftraten [67]. Die Niethärte hat nicht nur

einen Einfluss auf die grundsätzliche Herstellbarkeit der Verbindung, sondern auch auf die Verbindungsfestigkeit. Lou et al. [45] demonstrierten, dass nach dem Applizieren von elektrischem Strom beim Fügen die erreichte Härte im Nietschaft erhöht war und brachten dies in Zusammenhang mit der erhöhten Verbindungsfestigkeit unter Scherzugbelastung. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass nicht nur der Fügeprozess selbst, sondern ebenso die Nieteigenschaften einen wichtigen Einfluss auf die Verbindungsausbildung beim Halbhohlstanznieten haben.

2.3 Massivumformung hochstickstofflegierter Stähle

Das Umformen bildet entsprechend DIN 8580 die Hauptgruppe 2 der Fertigungsverfahren [15]. Gemäß DIN 8582 ist das Umformen dadurch definiert, dass dabei die Form eines festen Körpers plastisch verändert wird, wobei Masse und Zusammenhalt beibehalten werden [68]. Grundsätzlich kann in Bezug auf die Ausgangsform der Werkstücke zwischen der Blech- und der Massivumformung unterschieden werden [69]. Beim Massivumformen wird eine Veränderung des Körpers in alle drei Koordinatenrichtungen herbeigeführt, während beim Blechumformen die Blechdicke weitestgehend erhalten bleibt [70]. Durch Massivumformverfahren wie das Fließpressen ist in Verbindung mit der Variierung der Aktivelemente wie Stempel und Gegenstempel eine Vielzahl an Bauteilen herstellbar, welche sehr komplizierte Geometrien aufweisen können [71]. Hierbei besteht das große Potential, die Bauteileigenschaften gezielt zu beeinflussen und Bauteile mit einer entsprechend den Einsatzbedingungen angepassten Gradierung der mechanischen Eigenschaften herzustellen, wie es in [72] für eine Vielzahl von Umformprozessen und Bauteileigenschaften dargelegt ist. Merklein et al. [5] zeigten beispielsweise die Unterschiede hinsichtlich der Umformgradverteilung beim Voll-Vorwärts-Fließpressen im Vergleich zum Voll-Quer-Fließpressen von Zahnrädern und somit die Möglichkeit zur Beeinflussung der lokalen Bauteilfestigkeit durch die Wahl des Umformverfahrens auf. Des Weiteren konnten Merklein et al. [73] anhand der Untersuchung des Einflusses der Matrizengeometrie auf den Umformgrad beim Voll-Vorwärts-Fließpressen nachweisen, dass eine entsprechende Anpassung der Werkzeuggeometrie die Möglichkeit bietet, die erreichbaren maximalen Umformgrade sowie die Umformgradverteilung und damit auch die resultierende Härte der Bauteile zu beeinflussen. Tumer und Sonmez [74] demonstrierten bei einem Napf-Rückwärts-Fließpressprozess, wie mittels der Adaption der Umformwerkzeuge eine Veränderung der Härteverteilung im umgeformten Napf erreicht werden kann.

Demnach ermöglicht das Umformen die Fertigung hochbeanspruchbarer Bauteile mit hervorragenden mechanischen Eigenschaften. Als Werkstückwerkstoffe sind in diesem Fall hochverfestigende Werkstoffe wie beispielsweise hochstickstofflegierte Stähle prädestiniert. Hochstickstofflegierte Stähle sind durch einen außerordentlich hohen Gehalt an Stickstoff gekennzeichnet und weisen aufgrund dessen ausgezeichnete mechanische Eigenschaften auf. Sie kombinieren eine hohe Festigkeit mit hoher Duktilität und verfügen über eine gute Korrosionsbeständigkeit [75]. Neben austenitischen existieren auch martensitische hochstickstofflegierte Stähle. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Fokus auf austenitische Stähle gelegt. Diese können nicht durch konventionelle Wärmebehandlungsprozesse gehärtet werden [76]. Stattdessen sind hohe Festigkeiten durch die Kaltumformung erzielbar. Der geschichtliche Ursprung der Herstellung nichtrostender austenitischer Stähle wird mit der im Jahr 1912 von Krupp patentierten Sorte mit geringem Kohlenstoffgehalt, 18 % Chrom und 8 % Nickel verknüpft [76]. Die Legierungszusammensetzung spielt dabei eine wesentliche Rolle. Durch einen hohen Gehalt an Chrom von über 12 % sowie Nickel kann eine hohe Korrosionsbeständigkeit erreicht werden [77]. Vor dem Hintergrund der verknüpften Verfügbarkeit von Nickel während des zweiten Weltkrieges erlangte der Ersatz von Nickel durch Stickstoff für die Herstellung korrosionsbeständiger Stähle größere Bedeutung [78]. Weitere Vorteile des Ersetzens von Nickel ergeben sich im Hinblick auf das Risiko des Auftretens allergischer Reaktionen im Zusammenhang mit Nickel [79] sowie aufgrund des vergleichsweise hohen Nickelpreises [80]. Stickstoff wirkt darüber hinaus ebenso wie Nickel als Austenitbildner [76]. Die austenitstabilisierende Wirkung wird anhand der Untersuchungen mit einem Stahl mit einem Stickstoffgehalt von 0,9 % von Rashev et al. [81] deutlich, da das austenitische Gefüge des Stahls auch bei 70 % Kaltverfestigung erhalten blieb.

2.3.1 Stickstoff als Legierungselement

Die Löslichkeitsgrenze von Stickstoff in Reineisen bei 1600 °C unter atmosphärischem Druck liegt normalerweise bei einem Massenanteil von etwa 0,04 % [82]. Bei nichtrostenden Stählen wird die Löslichkeit von Stickstoff maßgeblich durch drei Einflussfaktoren bestimmt, durch die Legierungszusammensetzung, die Prozesstemperatur sowie den Druck bei der Herstellung [80]. Anhand der Zugabe von Chrom und Mangan kann die Löslichkeit von Stickstoff in der Schmelze erhöht werden [83]. Auch Molybdän und Vanadium tragen zur Erhöhung der Löslichkeit bei, während die Löslichkeit durch Elemente wie Nickel, Kobalt, Silizium und Kohlenstoff ver-

ringert wird [84]. Der Einfluss der Elemente auf die Löslichkeit von Stickstoff ist vorwiegend auf den Einfluss der Elektronenkonfiguration zurückzuführen. Werden die freien Elektronenplätze des Eisens hauptsächlich mit Elektronen eines anderen Legierungselements besetzt, nimmt die Stickstofflöslichkeit ab, während die Löslichkeit zunimmt, wenn Eisen Elektronen an ein Legierungselement abgeben kann und sich somit freie Plätze für die Aufnahme von Elektronen des Stickstoffs ergeben [84]. Neben der Wahl geeigneter Legierungselemente können außerdem durch spezielle Herstellungsverfahren unter Druck oder durch pulvermetallurgische Verfahren Stickstoffgehalte realisiert werden, welche über die genannte Löslichkeitsgrenze hinausgehen [85]. Ein etabliertes Verfahren stellt das Druck-Elektroschlacke-Umschmelzen (DESU-Verfahren) zur Herstellung druckaufgestickter Stähle dar, wobei durch einen erhöhten Druck der Erhalt des hohen Stickstoffgehalts auch beim Erstarren der Schmelze sichergestellt wird, wie von Stein et al. [86] dargelegt.

Bei hochstickstofflegierten Stählen gilt gemäß Gavriljuk und Berns [87] die Mischkristallhärtung als wesentlicher Härtungsmechanismus. Fremdatome können im Kristallgitter prinzipiell substitutionell oder interstitiell eingebracht sein. Bei interstitiellen Mischkristallen werden Zwischengitterplätze durch Legierungsatome besetzt, während sich die Atome bei substitutionellen Mischkristallen auf regulären Gitterplätzen befinden [88]. Sowohl Kohlenstoff als auch Stickstoff liegen interstitiell gelöst vor, wobei der Effekt von Stickstoff auf die Mischkristallhärtung größer ist als von Kohlenstoff [87]. Da die Gitterlücken in der Regel kleiner sind als die Legierungsatome, kommt es zu einer Verzerrung des umliegenden Gitterbereichs [88]. Hierdurch ergibt sich eine Festigkeitssteigerung. Zudem wird die Versetzungsbewegung durch die Interaktion zwischen Versetzungen und Fremdatomen erschwert. Müllner et al. [89] wiesen nach, dass die plastische Verformung bei hochstickstofflegierten Austeniten auf einer Kombination aus planarem Gleiten und Zwillingsbildung basiert. Auch Peng et al. [90] stellten bei der Untersuchung eines Stahls mit 0,6 % Stickstoff im Bereich von 26 % bis 36 % Kaltverfestigung einen Übergang von planarem Gleiten zur Zwillingsbildung als vorrangigen Mechanismus fest. Mit zunehmender Kaltumformung nimmt die Festigkeit zu, da es im Allgemeinen zu einer gegenseitigen Behinderung der durch das Gitter wandernden Versetzungen, zum Aufstauen der Versetzungen an Korngrenzen und zu einer Erhöhung der Versetzungsdichte kommt [77]. Kubota et al. [91] identifizierten eine erhöhte Versetzungsdichte durch Kaltumformung beim untersuchten hochstickstofflegierten Stahl im Gegensatz zu einem vergleichba-

ren Stahl mit geringerem Stickstoffgehalt. Infolgedessen können beim Kaltumformen hochstickstofflegierter Stähle Festigkeiten von mehr als 2000 MPa erzielt werden [92]. Einen weiteren Härtungsmechanismus stellt die Korngrenzenverfestigung dar. Aufgrund der starken Wechselwirkung von Stickstoff und Versetzungen werden Versetzungsquellen, welche für den Transport der plastischen Verformung über die Korngrenzen hinweg relevant sind, in angrenzenden Körnern blockiert, wodurch höhere Spannungen für das Lösen dieser Blockierungen notwendig sind [87]. Neben einer hohen Festigkeit weisen hochstickstofflegierte Stähle gleichzeitig eine hohe Duktilität auf. Während Kohlenstoff zu einer Reduzierung der Konzentration an freien Elektronen im Austenit und verstärkt zu kovalenten Bindungen führt, erhöht Stickstoff die Konzentration an freien Elektronen, wodurch sich eine stärkere Ausprägung der metallischen Bindung ergibt [87]. Auf dieser Basis lässt sich gemäß Ritzenhoff und Hahn [93] die hohe Duktilität dieser Stähle selbst bei hoher Verfestigung erklären. Hierin liegt darüber hinaus die hohe Korrosionsbeständigkeit begründet. Ausgehend von der kovalenten Bindung als charakteristische Bindungsart begünstigt Kohlenstoff die Clusterbildung von Cr-Atomen, während hingegen durch Stickstoff die homogene Verteilung von Cr-Atomen gefördert wird, was zu einer verringerten Ausscheidungsbildung von Chromkarbiden des Typs $M_{23}C_6$ im Bereich der Korngrenzen und damit zu einer geringeren Anfälligkeit gegenüber intergranularer Korrosion führt [93].

2.3.2 Einflussfaktoren auf die mechanischen Eigenschaften und das Umformverhalten

Es existieren unterschiedliche Einflussfaktoren, welche Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften und das Umformverhalten hochstickstofflegierter Stähle haben. Grundsätzlich hat der Zustand des Stahls einen Einfluss, wie in [94] anhand von Untersuchungen mit lösungsgeglühtem, warm- sowie kaltgewalztem CrMn-Stahl mit 0,83 % Stickstoff gezeigt wurde, wobei die Fließgrenze und die Zugfestigkeit mit zunehmendem Walzgrad zunahmen, während die Gleichmaßdehnung abnahm. Darüber hinaus zählen neben dem Stickstoffgehalt und der Korngröße im Wesentlichen die Temperatur und in diesem Kontext auch die Ausscheidung von Nitriden zu den maßgeblichen Einflussfaktoren. Abgesehen davon kann zudem die Dehnrates einen Einfluss haben. Die sich ergebenden Zusammenhänge werden im Folgenden näher erläutert.

Stickstoffgehalt

Mit steigendem Gehalt an interstitiell gelöstem Stickstoff nehmen sowohl die Fließgrenze als auch die Zugfestigkeit zu [80]. Simmons [92] stellte diesen Zusammenhang für eine Reihe von CrMnNi-Stählen mit unterschiedlichen Stickstoffgehalten dar, wobei die Zugfestigkeit von unter 700 MPa bei einem Gehalt von etwa 0,1 % auf mehr als 1100 MPa bei 1 % gesteigert wurde. Auch die Fließgrenze nahm in diesem Fall von etwa 200 MPa auf 700 MPa zu [92]. Eine Zunahme der Fließgrenze wurde auch in [95] für CrMn-Stähle mit 0,78 % bis 1,21 % Stickstoff aufgezeigt, wobei aber kaum ein Einfluss auf den Verfestigungsexponenten festgestellt wurde. Dass der Effekt der Zunahme der Fließgrenze unabhängig von der Legierungszusammensetzung auftritt und primär auf das Zulegieren des Stickstoffs zurückzuführen ist, verdeutlicht die Analyse verschiedener stickstofflegierter Stähle mit unterschiedlichem Gehalt an Chrom, Mangan und Nickel von Rawers und Grujicic [96]. Darüber hinaus nimmt mit zunehmendem Stickstoffgehalt auch die Härte zu, wobei annäherungsweise ein linearer Zusammenhang besteht, wie es von Speidel [80] für CrNi-Stähle mit Stickstoffgehalten bis zu knapp 1,5 % dargestellt wurde.

Korngröße

Norström [97] zeigte anhand von Untersuchungen mit Stählen mit Stickstoffgehalten von 0,05 % bis 0,18 % im Temperaturbereich von 20 °C bis 600 °C, dass sich die Fließgrenze hauptsächlich aus den beiden Komponenten Mischkristallhärtung und Korngrenzenverfestigung zusammensetzt. Die Korngröße beeinflusst daher mechanische Kennwerte wie die Fließgrenze und die Zugfestigkeit [80]. In [98] wurde bei der Untersuchung von Stahl mit einem Stickstoffgehalt von 0,82 % festgestellt, dass nicht nur die Fließgrenze und die Zugfestigkeit mit abnehmender Korngröße zunahmen, sondern auch die Härte. Allerdings war im Rahmen der Zugversuche eine Verringerung der Bruchdehnung mit abnehmender Korngröße erkennbar [98]. Wie groß der Einfluss der Korngröße auf die mechanischen Eigenschaften ist, hängt von weiteren Faktoren ab. Dies wird beispielsweise wiederum vom Stickstoffgehalt beeinflusst [97].

Temperatur

Hochstickstofflegierte Stähle können bei unterschiedlichen Temperaturen eingesetzt werden. Eine Besonderheit ist ihre hervorragende Eignung für kryogene Prozesse. Im Bereich tiefer Temperaturen unterhalb der Raumtemperatur bis hin zu 4 K ist prinzipiell eine Erhöhung der Fließgrenze mit abnehmender Temperatur im Vergleich zu Raumtemperatur festzustellen

[99], wobei zusätzlich eine Steigerung der Fließgrenze mit zunehmendem Stickstoffgehalt in Verbindung steht [92]. Gleichzeitig kann je nach Stickstoffgehalt auch bei tiefen Temperaturen eine hohe Duktilität aufrechterhalten werden [87]. Oberhalb der Raumtemperatur ist zunächst eine Abnahme der Fließgrenze und der Zugfestigkeit mit zunehmender Temperatur festzustellen. Bei den in [96] dargestellten Ergebnissen für verschiedene Stähle mit 0,11 % Stickstoff zeigt sich eine ausgeprägte Abnahme der Fließgrenze allerdings nur bis etwa 400 °C, während bei höheren Temperaturen bis zu etwa 600 °C kaum ein Temperatureinfluss erkennbar ist. Einen besonderen Effekt stellte Harzenmoser [100] bei seinen Untersuchungen mit unterschiedlichen CrMn-Stählen mit Stickstoffgehalten von 0,55 % bis knapp 1 % im Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und 400 °C fest, bei denen ein Minimum der Fließgrenze bei etwa 300 °C auftrat, während die Zugfestigkeit in diesem Temperaturbereich kontinuierlich abnahm. Dieser Effekt wurde darauf zurückgeführt, dass die Beweglichkeit der Stickstoffatome oberhalb der Raumtemperatur zunimmt, sodass die Stickstoffatome bei Temperaturen über 300 °C gemeinsam mit den Versetzungen durch das Gitter wandern, wodurch eine zusätzliche Kraft zur Bewegung der Versetzungen notwendig ist und wodurch die Fließgrenze wieder ansteigt [100]. In [101] ist sogar ein möglicher Temperaturbereich von 200 °C bis 600 °C angegeben, in welchem die Stickstoffatome zu den Versetzungen diffundieren und sich anheften. Eine weitere Erhöhung der Temperatur kann auch aufgrund von Kristallerholungs- und Rekristallisationseffekten zur erneuten Abnahme der Fließgrenze führen. Di Schino et al. [102] zeigten für Stahl mit 0,3 % Stickstoff anhand von Zugversuchen, dass die Fließgrenze im Temperaturbereich zwischen 600 °C und 900 °C stark abnimmt. Samantaray et al. [103] stellten für Stahl mit 0,14 % Stickstoff anhand von Druckversuchen bei Temperaturen von 850 °C bis 1150 °C ebenfalls eine Abnahme der Fließspannungen fest. Wie beim Einfluss der Korngröße existiert auch beim Einfluss der Umformtemperatur eine Abhängigkeit vom vorliegenden Stickstoffgehalt. In [97] wird eine zunehmende Temperaturabhängigkeit der Fließgrenze mit zunehmendem Stickstoffgehalt für Temperaturen zwischen 20 °C und 600 °C beschrieben.

Ausscheidungen

Vorrangig im Temperaturbereich von 500 °C bis 900 °C kann es gemäß Ritzenhoff et al. [104] zur Ausscheidung von Nitriden des Typs Cr_2N kommen, wobei durch diese intermetallische Phase die Duktilität erheblich verringert werden kann. Hierdurch wird auch die Rissanfälligkeit erhöht und das Auftreten interkristalliner Brüche kann begünstigt werden [93]. Bei der Ausscheidungsbildung spielt der Zustand, in welchem der Stahl vorliegt,

eine Rolle. Simmons et al. [105] detektierten bei dem untersuchten druckaufgestickten Stahl mit 0,69 % Stickstoff im kaltgewalzten Zustand mit einem Walzgrad von 20 % eine beschleunigte Bildung von Cr_2N im Vergleich zum lösungsgeglühten Zustand. In diesem Fall hatte die Ausscheidung von Cr_2N kaum Einfluss auf die Fließgrenze und die Zugfestigkeit [105]. Eine Steigerung der Härte konnten Vanderschaeve et al. [106] beim von ihnen untersuchten CrMn-Stahl mit 0,9 % Stickstoff auf die Ausscheidung von Cr_2N zurückführen. Die Härte wird außerdem dahingehend von der Ausscheidung von Chromnitriden beeinflusst, dass sie mit steigendem gesamtem Stickstoffgehalt zunimmt, ungeachtet dessen, dass der Stickstoff sowohl interstitiell gelöst als auch in Form von Nitriden vorliegt, wie aus Untersuchungen mit stickstofflegierten CrNi-Stählen in [107] hervorgeht.

Dehnrates

Grundsätzlich kann die Dehnrates einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und das Umformverhalten hochstickstofflegierter Stähle haben. Allerdings unterscheiden sich diesbezügliche Erkenntnisse stark voneinander. Im Rahmen der Untersuchung von CrMn-Stahl mit 0,83 % Stickstoff von Sun et al. [94] ergab sich für Dehnrates im Bereich von 10^{-4} s^{-1} bis 1 s^{-1} eine Zunahme der Fließgrenze und der Zugfestigkeit sowie eine Abnahme der Gleichmaßdehnung mit steigender Dehnrates. Ein Einfluss der Dehnrates wurde auch von Shao et al. [108] für CrMn-Stahl mit 0,63 % Stickstoff bei 10^{-4} s^{-1} und 10^{-2} s^{-1} aufgezeigt, wobei eine Verringerung der Zugfestigkeit bei höherer Dehnrates auftrat und das Umformverhalten unter Druckbeanspruchung weniger dehnratesensitiv als unter Zugbeanspruchung war. Kim et al. [109] hingegen stellten bei Stählen mit 0,51 % und 0,88 % Stickstoff für Dehnrates von $5 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ bis $5 \cdot 10^{-1} \text{ s}^{-1}$ keine Dehnratesabhängigkeit fest, außer wenn Nitride vorlagen. Durch diese unterschiedlichen Erkenntnisse wird ersichtlich, dass die Dehnrates bei der Umformung hochstickstofflegierter Stähle bereits bei Raumtemperatur einen Einfluss haben kann.

2.3.3 Umformtechnische Herstellung von Bauteilen aus hochstickstofflegierten Stählen

Aufgrund ihres Eigenschaftsprofils ergeben sich diverse Anwendungsbereiche für hochstickstofflegierte Stähle, zum Beispiel als Hochleistungswerkstoffe für Wellen und Lager bei Luft- und Raumfahrtanwendungen [93], Sicherungsringe in Turbogeneratoren zur Energieerzeugung [110] oder als Federdraht für die Feinwerktechnik [104]. Merklein et al. [111] zeigten, dass für

die Voll-Vorwärts-Fließpressteile bei der Verwendung von 1.3815 im Vergleich zum Vergütungsstahl 20MnB4 ein höheres Härteniveau erzielt werden kann, was sich auf die höhere Kaltverfestigung des druckaufgestickten Stahls zurückführen lässt. Die Erkenntnisse aus diesen Modellversuchen wurden auf einen fünfstufigen Umformprozess zur Herstellung von Schraubenrohlingen im industriellen Umfeld übertragen und im Speziellen für die Werkzeugauslegung zur Realisierung dieses Umformprozesses genutzt [112]. Große Bereiche der aus dem druckaufgestickten Stahl hergestellten Schraubenrohlinge wiesen doppelt so hohe Härtewerte auf wie die vergüteten Schraubenrohlinge aus 20MnB4 [113]. Hierdurch konnte das außerordentliche Potential hochstickstofflegierter Stähle für die Herstellung von Hochleistungsbauteilen und die Eignung als Alternativwerkstoffe zu den hierfür meist verwendeten Vergütungsstählen wie 20MnB4 aufgezeigt werden, wodurch die Herstellungsprozesse durch den Wegfall der üblicherweise notwendigen Wärmebehandlung verkürzt werden können.

In Bezug auf die Werkzeugauslegung stellt der Einsatz hochstickstofflegierter Stähle für die Kaltmassivumformung eine besondere Herausforderung dar. Der Werkstückwerkstoff hat nicht nur auf das Umformergebnis, sondern auch auf die resultierende Werkzeugbeanspruchung einen großen Einfluss, wie in [114] anhand der numerischen Analyse eines Voll-Vorwärts-Fließpressprozesses verdeutlicht wurde. Die hohe Kaltverfestigung hochstickstofflegierter Stähle hat eine außerordentliche Werkzeugbeanspruchung zur Folge, weshalb für die Kaltmassivumformung derartiger Stähle geeignete Werkzeugkonzepte und dementsprechend hochbeanspruchbare Umformwerkzeuge benötigt werden [115]. Massivumformprozesse sind infolge der hohen erforderlichen Umformkräfte ohnehin meist durch eine hohe Beanspruchung der Umformwerkzeuge gekennzeichnet [116]. Insbesondere die Verwendung von Werkstückwerkstoffen mit immer weiter zunehmenden Festigkeiten und der Einsatz komplizierter Werkstückgeometrien führen Engel et al. [117] zufolge zu einer Erhöhung der Werkzeugbeanspruchung und damit zu steigenden Anforderungen an die Umformwerkzeuge. Ungünstige Werkzeuggeometrien mit engen Radien oder Querschnittsübergänge können eine inhomogene Spannungsverteilung mit Spannungsspitzen im Werkzeug hervorrufen [118]. Beim Kaltfließpressen beispielsweise stellt zwar bei einfachen Massenteilen der Verschleiß, aber bei komplizierten Umformprozessen und Bauteilen das Versagen durch Bruch die Hauptausfallursache der Werkzeuge dar [119].

Daher ist offensichtlich, dass gerade bei der Umformung hochstickstofflegierter Stähle die Kenntnis der während der Umformung auftretenden Werkzeugbeanspruchung eine wichtige Voraussetzung ist, um durch eine

beanspruchungsgerechte Auslegung die Beanspruchbarkeit der Werkzeuge sicherzustellen und Werkzeugversagen infolge des Auftretens kritischer Spannungen zu vermeiden. Bei der Werkzeugauslegung bieten gemäß Lange et al. [120] unter anderem die Auswahl der Werkzeugwerkstoffe und die konstruktive Gestaltung der Aktivteile Möglichkeiten, um die Lebensdauer der Umformwerkzeuge zu steigern. Darüber hinaus können hierdurch Prozessgrenzen erweitert werden, um somit Umformprozesse mit hohen Beanspruchungen überhaupt zu realisieren. Beim Fließpressen werden als Werkzeugwerkstoffe im Allgemeinen Kaltarbeitsstähle, Warmarbeitsstähle, Schnellarbeitsstähle und Hartmetalle eingesetzt [121]. Hartmetalle werden hauptsächlich dann genutzt, wenn aufgrund des Auftretens hoher Kontaktnormalspannungen zwischen Werkstück und Aktivteilen außerordentlich hohe Druckfestigkeiten erforderlich sind und sie eignen sich Andreas et al. [122] zufolge auch als Matrizenwerkstoff, wenn eine ausreichende Vorspannung mithilfe von Armierungsringen zur Reduzierung kritischer Zugbeanspruchungen erfolgt. Da Hartmetalle im Allgemeinen verringerte Zugfestigkeiten aufweisen und das Auftreten versagenskritischer Zugbeanspruchungen daher unbedingt verhindert werden muss, ist das ausreichende Vorspannen von Matrizen aus Hartmetall ausschlaggebend [122]. Noneder et al. [123] führten Untersuchungen zur Umformung des druckaufgestickten Stahls 1.3815 mittels eines Voll-Vorwärts-Fließpressprozesses durch und legten dar, dass im Hinblick auf die hohen auftretenden Druckspannungen der Einsatz von Hartmetall als Matrizenwerkstoff in Kombination mit einer Dreifacharmierung zur Reduzierung der Zugspannungen zielführend ist. Der Einsatz von Hartmetall als Werkstoff für die Aktivteile kann sich in diesem Zusammenhang sogar günstig auf die Maßgenauigkeit der umgeformten Bauteile auswirken. Beim Einsatz von Matrizenwerkstoffen mit hohem E-Modul kann die elastische Deformation der Matrize verringert und somit die Maßgenauigkeit der Bauteile gesteigert werden [114].

2.4 Zusammenfassende Bewertung

Für die Mobilität der Zukunft ist der Leichtbau ein Schlüsselfaktor, um Zielvorgaben für den Klimaschutz erfüllen zu können. Die Verwendung von Mischbauweisen mit Blechwerkstoffen mit immer höheren Festigkeiten zur Erfüllung steigender Sicherheitsanforderungen beispielsweise im Automobilsektor stellt eine große Herausforderung hinsichtlich der Herstellung qualitätsgerechter Fügeverbindungen dar. Aus diesem Grund sind mechanische Fügeverfahren als fester Bestandteil der industriellen Produktionsprozesse etabliert. Ein bewährtes mechanisches Fügeverfahren ist das

Halbhohlstanznieten, welches für die Realisierung von Leichtbaukonzepten eine hervorgehobene Bedeutung hat. Die Herstellung der Halbhohlstanzniete setzt sich typischerweise aus einem mehrstufigen Kaltumformprozess mit anschließender Wärmebehandlung und Beschichtung der Niete zusammen, da die Niete eine ausreichende Festigkeit, Duktilität und Korrosionsbeständigkeit aufweisen müssen [6].

Begründet durch die bisher geltende Unabdingbarkeit der nachgelagerten Prozessschritte des Vergütens und Beschichtens der Niete nach der Umformung ist die gesamte Prozesskette sehr zeit- und kostenintensiv sowie mit hohem Energieaufwand verbunden. Vor dem Hintergrund des Trends hin zu hocheffizienten Prozessketten besteht der Bedarf, die Wärmebehandlung kaltmassivumgeformter Bauteile zu vermeiden [5]. Dass 40 % des Energieverbrauchs im industriellen Umfeld in Deutschland Wärmebehandlungsprozessen zugeordnet werden [22], verdeutlicht die Notwendigkeit neuer Ansätze für eine Steigerung der Nachhaltigkeit von Produktionsprozessen. Es gab in der Vergangenheit bereits Bestrebungen, konventionelle Nietwerkstoffe zu substituieren und auf diese Weise die Prozesskette zu verkürzen. Die Herangehensweise in [28] und [29] basiert auf der Nutzung rostfreier Stähle als Nietwerkstoffe. Im Hinblick auf die hohen Festigkeiten moderner Blechwerkstoffe ist die erzielte Festigkeit der Niete allerdings als nicht ausreichend einzustufen [124]. Dementsprechend wurde das bestehende Potential zur Verkürzung der Prozesskette bei der Nietherstellung durch den Entfall der Wärmebehandlung und des Beschichtens bislang nicht ausgeschöpft.

Eine Steigerung der Festigkeit der Niete, welche für das Fügen hochfester Bleche essentiell ist, ist meist mit einer Verringerung der Duktilität verbunden, welche für das Aufspreizen des Niets von Bedeutung ist. Aufgrund dieser sich ergebenden Anforderungen an die mechanischen Nieteigenschaften bedarf es des Einsatzes von Nietwerkstoffen, welche eine ausreichende Festigkeit bei gleichzeitig hoher Duktilität aufweisen [67]. Durch die Verwendung hochverfestigender Werkstoffe wie hochstickstofflegierter Stähle als Nietwerkstoffe ergibt sich die Möglichkeit, die zuvor genannten nachgelagerten Prozessschritte einzusparen und dennoch das Fügen hochfester Bleche zu ermöglichen. Die hohe Kaltverfestigung derartiger Stähle in Kombination mit der aus produktionstechnischer Sicht anspruchsvollen Geometrie von Halbhohlstanznieten stellt eine besondere Herausforderung im Hinblick auf die Beanspruchung der Umformwerkzeuge dar. Für die Nutzbarmachung der vorteilhaften Eigenschaften hochstickstofflegierter Stähle für den Einsatz als Nietwerkstoffe sind daher geeignete Umformstrategien und eine umfassende Prozesskenntnis erforderlich.

Es existieren unterschiedliche Forschungsarbeiten in der Literatur, welche sich größtenteils auf die Untersuchung einzelner Einflussfaktoren auf das Umformverhalten und die Werkstoffeigenschaften hochstickstofflegierter Stähle beziehen. Auch Untersuchungen zur Herstellung kaltmassivumgeformter Bauteile aus hochstickstofflegierten Stählen waren in der Vergangenheit bereits vereinzelt Gegenstand der Forschung. Dennoch liegen bezüglich der Einflüsse von Prozessparametern und Werkstoffeigenschaften auf die resultierenden Bauteileigenschaften, insbesondere in Bezug auf die Gradierung, kaum Erkenntnisse vor. Es fehlt bislang ein ganzheitliches Prozessverständnis, welches die Kenntnis der Zusammenhänge zwischen Prozessparametern, der Werkzeugbeanspruchung und den resultierenden Bauteileigenschaften umfasst und welches für die umformtechnische Herstellung von Nieten aus hochverfestigenden Werkstoffen notwendig ist. An dieser Stelle besteht demzufolge Forschungsbedarf, um eine Grundlage für die Nutzung der Potentiale hochverfestigender Nietwerkstoffe in der Zukunft legen zu können. Die Möglichkeit, hochfeste Niete mit einer für das Fügen angepassten Gradierung der mechanischen Eigenschaften zur Beeinflussung der Verbindungsbildung herzustellen, ist bisher aufgrund des erforderlichen Vergütens, wodurch sich die homogenen Eigenschaften konventioneller Niete ergeben, ausgeschlossen.

3 Zielsetzung und methodisches Vorgehen

Das Ziel der Arbeit ist es, ein grundlegendes Prozessverständnis für die Herstellung von Halbhohlstanznieten aus hochverfestigenden Werkstoffen mittels Umformen zu erarbeiten. Indem Einflüsse auf die lokalen Nieteigenschaften aufgezeigt werden, sollen grundlegende Kenntnisse geschaffen werden, welche eine Voraussetzung für die zukünftige Herstellung von Nieten mit für das Fügen maßgeschneiderten gradierten Eigenschaften darstellen. Im Fokus der Untersuchungen steht der Einsatz von hochstickstofflegiertem Stahl als Nietwerkstoff, um durch den Entfall der Wärmebehandlung und Beschichtung der Niete eine Verkürzung der Prozesskette zu erreichen. Vor dem Hintergrund der erhöhten Fließspannung und Werkzeugbeanspruchung infolge der hohen Kaltverfestigung soll eine geeignete Umformstrategie erarbeitet und der grundsätzliche Machbarkeitsnachweis erbracht werden. Um ein umfassendes Prozessverständnis aufzubauen, sollen anhand der Analyse der Einflüsse bei der Nietherstellung Kausalzusammenhänge ermittelt werden. Zur Erreichung des Ziels der Arbeit wird die in Bild 2 dargestellte methodische Vorgehensweise genutzt.

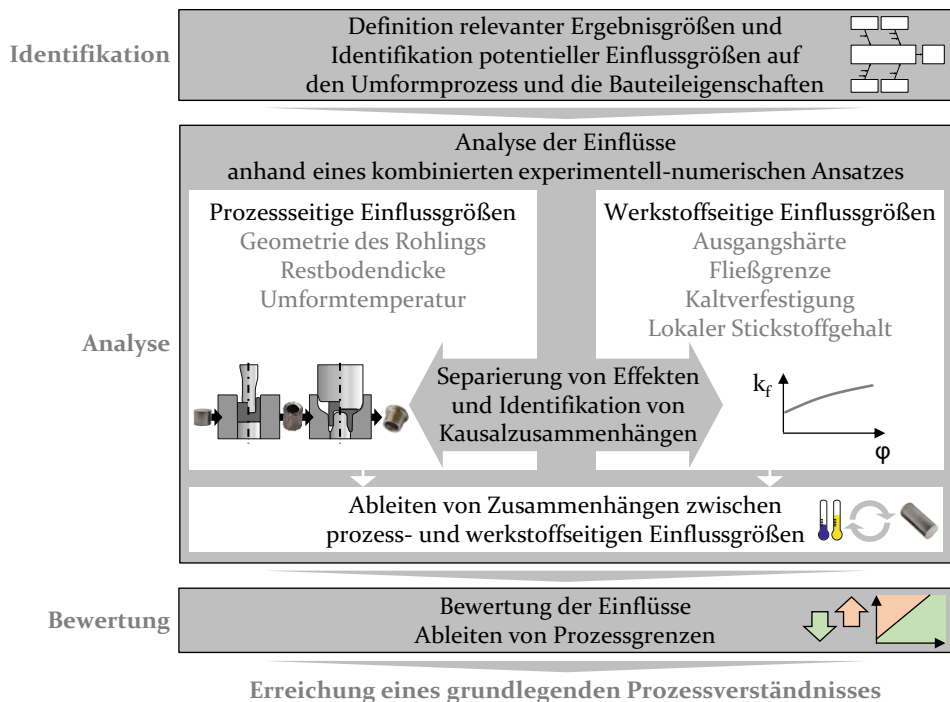


Bild 2: Methodische Vorgehensweise

Die Grundlage der Untersuchungen bildet die systematische Identifikation potentieller Einflussfaktoren auf relevante Ergebnisgrößen wie die Prozesskräfte und die Werkzeugbeanspruchung im Umformprozess, die erreichbare Bauteilgeometrie und die resultierenden mechanischen Bauteileigenschaften unter Nutzung der Ishikawa-Methode. Neben prozessseitigen Einflussgrößen wie der Umformtemperatur und den Maßen der verwendeten Rohlinge werden außerdem werkstoffseitige Einflussgrößen wie die Ausgangshärte, die Fließgrenze und das Verfestigungsverhalten des Nietwerkstoffs berücksichtigt. Da der potentielle Einsatz eines hochstickstofflegierten Stahls als Nietwerkstoff untersucht wird, ist hierbei außerdem die Analyse des lokalen Stickstoffgehalts enthalten.

Für die umfassende Analyse der identifizierten potentiellen Einflüsse wird ein kombinierter experimentell-numerischer Ansatz genutzt, um hierauf basierend Kausalzusammenhänge zu ermitteln. Vor dem Hintergrund der hohen Fließspannung bei der Umformung hochverfestigender Werkstoffe ist die Erarbeitung eines geeigneten Werkzeugkonzepts zwingend notwendig, weshalb für die Konzipierung des Versuchsaufbaus zur experimentellen Nietherstellung die auftretende Werkzeugbeanspruchung auf Basis einer numerisch gestützten Auslegung einbezogen wird. Das hierfür aufgebaute numerische FE-Modell dient darüber hinaus der simulativen Analyse des Nietherstellprozesses, um die Einflüsse auf den Stofffluss und die Verfestigung während der Umformung zu eruieren und somit ein tiefergehendes Prozessverständnis zu generieren. Um die resultierenden Nieteigenschaften im Hinblick auf die Anforderungen im Fügeprozess zu evaluieren, werden die Auswirkungen der Einflussgrößen auf die geometrischen und mechanischen Eigenschaften experimentell hergestellter Bauteile anhand optischer 3D Messungen und Härtemessungen untersucht. Aufbauend auf den durchgeführten experimentellen und numerischen Analysen erfolgt die Korrelation des Stoffflusses und der Verfestigung mit den Prozesskräften, der Werkzeugbeanspruchung und den Bauteileigenschaften in Abhängigkeit von den untersuchten Einflussgrößen. Da es bei der Nietherstellung bei erhöhter Temperatur zu einer Überlagerung der temperaturbedingten und der weiteren prozessseitigen Einflüsse kommt, spielt insbesondere die Separierung von Temperatureffekten eine wichtige Rolle für die Identifikation von Zusammenhängen auf Basis der eindeutigen Zuordnung von Einflussgrößen und Auswirkungen. Auf diese erforderliche Abgrenzung der Effekte wird mit der Erarbeitung einer analytisch basierten Methode abgezielt, mittels welcher der Temperatureinfluss auf die geometrischen Parameter des Bauteils durch eine gezielte Anpassung des Stempelwegs ausgeschlossen wird.

Ein ganzheitliches Prozessverständnis wird anhand der Erforschung von Zusammenhängen zwischen prozessseitigen und werkstoffseitigen Einflussfaktoren erreicht. Durch das Zusammenführen der Erkenntnisse werden Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen Prozessparametern wie der Umformtemperatur, den mechanischen Eigenschaften des Nietwerkstoffs, der auftretenden Werkzeugbeanspruchung und den resultierenden Nieteigenschaften identifiziert. Die abschließende Bewertung der ermittelten Einflüsse auf den Umformprozess und die Bauteileigenschaften und die in diesem Zusammenhang abgeleiteten Prozessgrenzen stellen eine wichtige Grundlage für die Sicherstellung der Herstellbarkeit der Niete aus hochverfestigenden Werkstoffen dar.

Die Erarbeitung eines grundlegenden Prozessverständnisses anhand des Ableitens der genannten Zusammenhänge ist eine wesentliche Voraussetzung für die zielgerichtete Gradierung der mechanischen Eigenschaften hochfester Hilfsfügeteile aus hochverfestigenden Werkstoffen. Hierdurch wird die Ausweitung moderner Mischbauweisen gefördert, deren Einsatz zur Steigerung der Nachhaltigkeit und des Umweltschutzes für die zukünftige Gewährleistung der Mobilität in unserer Gesellschaft unerlässlich ist. Durch das Erreichen einer Verkürzung der Nietherstellprozesskette leistet diese Arbeit einen Beitrag auf dem Weg der Transformation hin zu hoch-effizienten Fertigungsprozessen und ressourcenminimierter Produktion.

4 Werkstoffe, experimentelle Untersuchungen und Methoden

Für die Erarbeitung eines grundlegenden Prozessverständnisses der umformtechnischen Herstellung von Nieten aus hochverfestigenden Werkstoffen werden verschiedene Untersuchungsmethoden und Messverfahren eingesetzt, welche in den nachfolgenden Abschnitten erläutert werden. Im Zuge dessen werden die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Werkstoffe sowie das Vorgehen bei deren Charakterisierung beschrieben. Neben der für die experimentelle Nietherstellung genutzten Anlage werden die für die Analyse des Umformprozesses angewendeten analytischen Methoden und die Simulationsmethode sowie die Messverfahren und Auswertemethoden für die Untersuchung der umgeformten Bauteile vorgestellt.

4.1 Untersuchte Werkstoffe

Bei den Untersuchungen steht der hochstickstofflegierte, austenitische Stahl 1.3815 (X8CrMnN19-19) als potentieller Nietwerkstoff im Fokus. Hierbei handelt es sich um einen druckaufgestickten Stahl, welcher von dem Unternehmen Energietechnik Essen hergestellt wird und auch die herstellerspezifische Bezeichnung P 900 N trägt. Die Herstellung von druckaufgestickten Stählen erfolgt bei Energietechnik Essen mittels des DESU-Verfahrens bei einem Druck von maximal 40 bar, wobei Stickstoff der Schmelze in Form von Si_3N_4 , einer Mischung aus Stickstoff und Argon oder in reiner Form zugeführt wird [125]. Durch das Zulegieren des Stickstoffs kann die Festigkeit des Werkstoffs gesteigert werden, ohne dass die Duktilität verringert wird. Aufgrund der hohen Kaltverfestigung können je nach Umformgrad Festigkeiten von über 2000 MPa erreicht werden [126]. Zudem wird durch den Stickstoff die Korrosionsbeständigkeit erhöht, wobei der druckaufgestickte Stahl 1.3815 sogar als seewasserbeständig einzuordnen ist [126]. In Bezug auf die genannten Eigenschaften stellt der Werkstoff 1.3815 eine vielversprechende Alternative zu den bislang üblicherweise verwendeten Nietwerkstoffen dar. Als zweiter potentieller Nietwerkstoff sowie als Referenzwerkstoff für die Untersuchungen wird der austenitische Edelstahl 1.4541 (X6CrNiTi18-10) gewählt und zur Analyse der werkstoffseitigen Einflussgrößen herangezogen. Die chemische Zusammensetzung der untersuchten Werkstoffe ist in Tabelle 1 dargestellt, wobei im druckaufgestickten Stahl 1.3815 ferner 0,0001 % Bor enthalten ist, was in der Tabelle nicht

explizit aufgeführt ist. Der druckaufgestickte Stahl 1.3815 zeichnet sich gegenüber dem Referenzwerkstoff 1.4541 durch einen vergleichsweise hohen Stickstoffgehalt von 0,76 % aus.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der Werkstoffe unter Angabe der Massenanteile in % von 1.3815 [127] und 1.4541 [128]

Werkstoff	C	N	Al	Si	P	S	Ti	V
1.3815	0,080	0,760	0,009	0,950	0,020	0,001	0,001	0,050
1.4541	0,020	0,020	k. A.	0,410	0,030	0,018	0,270	k. A.
Werkstoff	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Nb	Mo	W
1.3815	17,070	18,860	0,000	0,580	0,040	0,005	0,080	k. A.
1.4541	17,140	1,550	0,200	9,190	0,610	k. A.	0,240	k. A.

4.2 Werkstoffcharakterisierung

Die Ermittlung der Fließkurven von Werkstoffen ermöglicht ein grundlegendes Verständnis bezüglich der Umformbarkeit und der mechanischen Eigenschaften der Werkstoffe. Des Weiteren stellen die Fließkurven eine relevante Eingangsgröße für die numerische Analyse von Umformprozessen mittels FE-Simulation dar, welche auch einen Einfluss auf die Abbildungsgenauigkeit des numerischen Modells hat. Insbesondere im Hinblick auf die Werkzeugauslegung auf Basis der numerischen Analyse der auftretenden Spannungen im Umformwerkzeug ist daher die Ermittlung der Fließkurven von großer Bedeutung. Noneder et al. [129] führten sowohl Zug- als auch Stauchversuche mit dem druckaufgestickten Stahl 1.3815 durch und zeigten anhand ihrer Untersuchungen, dass der Werkstoff eine Zug-Druck-Anomalie aufweist. Für die Abbildung des im Rahmen der Arbeit untersuchten Nietherstellprozesses sind in Bezug auf die vorherrschende Druckbeanspruchung mithilfe von Stauchversuchen ermittelte Fließkurven besser geeignet. Zudem wird der Stauchversuch für die Fließkurvenermittlung in der Massivumformung eingesetzt, wenn die Charakterisierung für möglichst hohe Umformgrade erfolgen soll [77], wie es auch für die Charakterisierung der Nietwerkstoffe im Hinblick auf die hohen Umformgrade bei der Umformung der Niete zutrifft. Dementsprechend wird für die Ermittlung der Fließkurven im Rahmen dieser Arbeit der Zylinderstauchversuch gewählt. Neben den mechanischen Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe spielt auch die Reibung eine zentrale Rolle in Umformprozessen. Gängige Modellversuche zur Ermittlung der Reibung in Massivumformprozessen sind der Double-Cup-Extrusion-Test (DCE-Test) und der Ringstauchversuch. Bei den in [115] durchgeführten Untersuchun-

gen mit druckaufgestickten Stählen erwies sich der DCE-Test als ungeeignet für die Ermittlung der Reibungsbedingungen bei der Umformung der druckaufgestickten Stähle. Daher erfolgt die Reibungscharakterisierung im Rahmen dieser Arbeit mithilfe des Ringstauchversuchs. In den nachfolgenden Abschnitten werden die durchgeführten Untersuchungen zur Charakterisierung der verwendeten Werkstoffe beschrieben.

4.2.1 Zylinderstauchversuch

Die Fließkurven der potentiellen Nietwerkstoffe werden mithilfe von Zylinderstauchversuchen nach DIN 50106 [130] bestimmt. Es werden zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von 9 mm und einer Höhe von 6 mm verwendet. Um bereits im Rahmen der Werkstoffcharakterisierung den Einfluss der Umformtemperatur auf die mechanischen Eigenschaften der potentiellen Nietwerkstoffe grundlegend zu ermitteln, erfolgen die Stauchversuche sowohl bei Raumtemperatur als auch bei erhöhten Temperaturen. Daher werden die Versuche unter Nutzung der thermomechanischen Prüfmaschine Gleeble 3500 des Herstellers Dynamic Systems mit einer Maximalkraft von 100 kN durchgeführt, welche das Aufheizen der Probe mittels direkter Widerstandserwärmung ermöglicht. Hierfür ist ein schichtweiser, werkstoffspezifischer Aufbau der Stauchbahnen in Anlehnung an [131] erforderlich, welcher aus zylindrischen Hartmetallkomponenten, Graphitfolie und Kupferplättchen besteht. Zur Überprüfung der Probertemperatur während des Versuchs werden Thermoelemente vom Typ K an der Oberfläche in der Probenmitte angeschweißt, wodurch eine konstante Probertemperatur sichergestellt werden kann. Für die Untersuchungen bei Temperaturen bis zu 300 °C wird als Schmierstoff das Hochleistungsfließpressöl Dionol® ST V 1260 der Firma MKU-Chemie verwendet, da es speziell für Umformprozesse mit hohen Kontaktdrücken geeignet ist und demzufolge auch für die experimentelle Nietherstellung im Rahmen dieser Arbeit genutzt wird. Bei den Versuchen bei Umformtemperaturen oberhalb von 300 °C kommt Nickelpaste als Schmiermittel zum Einsatz. Zu Beginn des Versuchs erfolgt das Erwärmen der Probe mit einer Aufheizrate von 5 K/s bis zur Zieltemperatur und ein anschließendes Halten der Zieltemperatur für eine Minute, um bei beginnender Umformung eine homogene Probertemperatur zu gewährleisten. Die Versuche werden bei einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min durchgeführt. Die Versuchsauswertung ist prinzipiell bis zu einem maximalen Umformgrad von 0,7 sinnvoll, da bei einer Ausbauchung der Probe der einachsige Spannungszustand nicht mehr gegeben ist [69]. Im Hinblick auf die Maximalkraft der Prüfmaschine wird das Erreichen einer Kraft von 90 kN als

Abbruchkriterium für die Versuche definiert. In dem Fall, dass dieses Kriterium nicht erreicht wird, werden die Fließkurven bis zu einem Umformgrad von 0,7 ermittelt. Die Fließkurven werden auf Basis der Kraft-Weg-Daten der Maschine unter Berücksichtigung der Maschinenauffederung bestimmt. Anhand der Spannungs-Dehnungs-Kurven werden zudem Kennwerte wie die Fließgrenze und der Verfestigungsexponent zur Beurteilung der Kaltverfestigung der potentiellen Nietwerkstoffe berechnet. Der Verfestigungsexponent wird in Anlehnung an DIN EN ISO 10275 [132] über den Bereich zwischen 5 % und 20 % plastischer Dehnung bestimmt. Da bei der experimentellen Nietherstellung lokal höhere Umformgrade als 0,7 auftreten und das Werkstoffverhalten in der Simulation des Nietherstellprozesses auch für die höheren Umformgrade abgebildet werden soll, um das Erreichen möglichst realitätsnaher Ergebnisse bei der numerischen Analyse zu ermöglichen, werden die Fließkurven mithilfe des Ansatzes nach Hockett und Sherby [133] approximiert und extrapoliert. Gemäß der Untersuchungsergebnisse in [129] ist der Ansatz nach Hockett und Sherby besonders geeignet, um bei der Approximation der Fließkurve druckaufgestickter Stähle eine ausreichende Genauigkeit zu erreichen. Hierzu werden die Parameter für die Berechnung der Fließspannung mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate ermittelt.

Die Nietherstellung erfolgt durch eine mehrstufige Umformung. Die Wahl der Umformtemperatur in einer der Umformstufen kann einen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des als Zwischenprodukt fungierenden Bauteils nach dieser Umformstufe haben und kann demzufolge auch indirekt die Umformung in der nachfolgenden Umformstufe beeinflussen. Für den Aufbau eines umfassenden Prozessverständnisses ist daher die Kenntnis des Einflusses unterschiedlicher Temperaturkombinationen bei einer mehrstufigen Umformung notwendig. Aus diesem Grund werden zusätzlich zu den bereits zuvor beschriebenen Stauchversuchen zweistufige Stauchversuche mit dem druckaufgestickten Stahl 1.3815 durchgeführt, bei welchen verschiedene Kombinationen der Temperatur bei der ersten Stauchung und der Temperatur bei der zweiten Stauchung in die Untersuchungen einbezogen werden. Das Vorgehen ist in Bild 3 veranschaulicht. Hierfür werden die Proben zunächst um 20 % bezogen auf die Ausgangshöhe gestaucht. Im Anschluss daran wird der Versuch unterbrochen, sodass ein Abkühlen der Proben an der Luft erfolgen kann, wenn die erste Stauchung bei erhöhter Temperatur statt Raumtemperatur durchgeführt wird. Schließlich werden die Proben bei der zweiten Stauchung um weitere 20 % bezogen auf die ursprüngliche Ausgangshöhe gestaucht.

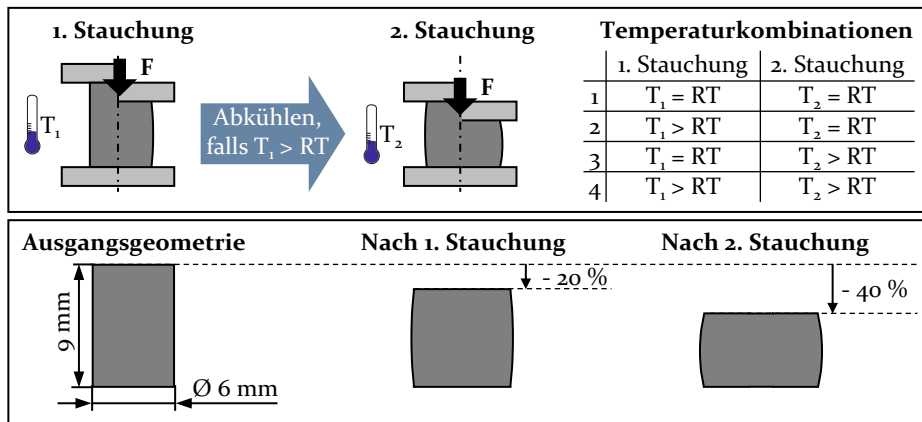


Bild 3: Prinzipielles Vorgehen bei den zweistufigen Stauchversuchen

Die im Rahmen der zweiten Stauchung ermittelten Fließkurven werden dahingehend korrigiert, dass die bei der ersten Stauchung jeweils erreichten maximalen Umformgrade hinzuaddiert werden. Auf diese Weise wird die vorhergehende Umformung der Proben berücksichtigt. Somit können Unterschiede bezüglich der Fließkurven in Abhängigkeit von den untersuchten Temperaturkombinationen identifiziert werden. Dies ermöglicht eine grundlegende Beurteilung des Einflusses verschiedener Temperaturkombinationen bei einer mehrstufigen Umformung auf die allgemeinen Umformigenschaften des druckaufgestickten Stahls.

4.2.2 Ringstauchversuch

Die Temperatur beeinflusst nicht nur die Umformigenschaften eines Werkstoffs, sondern auch die Reibung. Im geschmierten Zustand kann es mit zunehmender Temperatur zu einer Erhöhung des Reibfaktors kommen, was auf die Veränderung der Viskosität des Schmierstoffs zurückgeführt werden kann [134]. So kann bereits bei Temperaturen knapp oberhalb von 200 °C ein Abreißen des Schmierfilms auftreten und die Reibung bei höheren Temperaturen stark ansteigen [135]. Um die Reibfaktoren auf Basis des Reibfaktormodells in Abhängigkeit von der Umformtemperatur zu ermitteln, werden im Rahmen dieser Arbeit Ringstauchversuche bei unterschiedlichen Temperaturen unter Nutzung der thermomechanischen Prüfmaschine Gleeble 3500, welche auch für die Zylinderstauchversuche zum Einsatz kommt, durchgeführt. Beim Ringstauchversuch nach Male und Cockroft [136] wird der Reibfaktor auf Basis des Stauchens einer ringförmigen Probe mit dem Außendurchmesser d_a , dem Innendurchmesser d_i und

der Höhe h anhand der Veränderung des Innendurchmessers in Abhängigkeit von den vorherrschenden Reibungsbedingungen bestimmt, wobei das Verhältnis $d_a:d_i:h$ üblicherweise 6:3:2 beträgt. Dementsprechend werden Probekörper mit $d_a = 9,0$ mm, $d_i = 4,5$ mm und $h = 3,0$ mm verwendet. Um hinsichtlich der Nietherstellung realitätsnahe Rahmenbedingungen zu schaffen, wird das auch für die experimentelle Nietherstellung genutzte Fließpressöl Dionol® ST V 1260 als Schmierstoff für die Untersuchungen eingesetzt. Die Probe wird mit einer Aufheizrate von 5 K/s erwärmt. Die Haltezeit nach dem Erreichen der Zieltemperatur beträgt eine Minute, ehe die Stauchung um 20 % bei einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 5 mm/min erfolgt. Nach der Umformung werden die resultierenden Innendurchmesser der ringförmigen Proben anhand taktiler Messungen mithilfe des Koordinatenmessgeräts PMM 654 der Firma Leitz ermittelt. Da die Verwendung generalisierter Kalibrierkurven zur Bestimmung des Reibfaktors in Abhängigkeit vom Innendurchmesser und von der Probenhöhe zu einer fehlerhaften Abschätzung des Reibfaktors führen kann [137], werden für die untersuchten Nietwerkstoffe spezifische Kalibrierkurven in Abhängigkeit von der Umformtemperatur mittels numerischer Variantensimulation ermittelt. Hierfür wird ein numerisches Modell zur Abbildung des Ringstauchversuchs unter Nutzung der Simulationssoftware simufact.forming von Simufact Engineering in der Version 14.0.1 aufgebaut, wobei die auf Basis der Stauchversuche berechneten Fließkurven importiert und als Materialdaten verwendet werden. Für die Definition der Reibung wird das Reibfaktormodell eingesetzt. Der Reibfaktor wird zwischen 0,05 und 0,50 mit einer Schrittweite von 0,05 variiert und der zugehörige Innendurchmesser ermittelt. Ausgehend von den auf diese Weise erhaltenen Datenpunkten wird die spezifische Kalibrierkurve zur Identifikation des Reibfaktors in Abhängigkeit vom erreichten Innendurchmesser mittels Fitting unter Verwendung der Software MATLAB des Unternehmens MathWorks in der Version R2018b abgeleitet.

Um die Gültigkeit der auf diese Weise identifizierten Reibfaktoren beurteilen zu können, ist eine Validierung des numerischen Modells erforderlich. Eine Möglichkeit zur Validierung bietet der Vergleich von Kraft-Weg-Verläufen aus Simulation und Experiment [138], weshalb diese Methode im Rahmen dieser Arbeit genutzt wird. Zusätzlich wird die Probengeometrie nach der Umformung in Simulation und Experiment verglichen. Des Weiteren erfolgt ein qualitativer Vergleich der numerisch ermittelten Umformgradverteilung mit der Härteverteilung der Probe aus dem Experiment, wobei zur Ermittlung der Härteverteilung Mikrohärtemessungen nach DIN EN ISO 14577-1 [139] mithilfe des Mikrohärtemessgeräts Fischerscope®

HM2000 der Firma Helmut Fischer durchgeführt werden. Die Umformgradverteilung und die Härteverteilung sind zwar nicht direkt vergleichbar, allerdings besteht dahingehend ein Zusammenhang, dass hohe lokale Umformgrade mit hohen lokalen Härtewerten korrelieren, während geringe lokale Umformgrade mit geringen lokalen Härtewerten in Verbindung stehen [134]. Der Vergleich der genannten Daten ist in Bild 4 exemplarisch für Ringstauchversuche mit dem druckaufgestickten Stahl 1.3815 bei Raumtemperatur veranschaulicht.

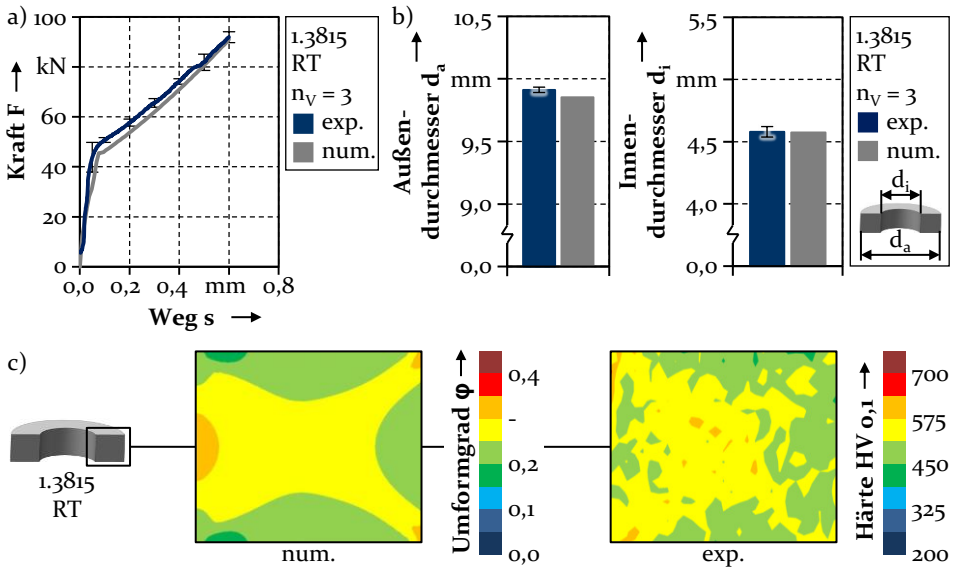


Bild 4: Experimentell (exp.) und numerisch (num.) ermittelte a) Kraft-Weg-Verläufe, b) Probengeometrie und c) Umformgrad- und Härteverteilung

Die experimentell und simulativ ermittelten Kraft-Weg-Verläufe weisen eine gute Übereinstimmung auf, wobei die Abweichung der Maximalkraft von 90,6 kN in der Simulation im Vergleich zur Maximalkraft von $92,0 \pm 2,2$ kN im Experiment lediglich 1,5 % beträgt. Die Abweichungen der resultierenden Innen- sowie Außendurchmesser nach der Umformung liegen bei weniger als 1,0 %. Darüber hinaus liegt weitestgehend eine Übereinstimmung der Bereiche, welche höhere lokale Umformgrade beziehungsweise höhere lokale Härtewerte aufweisen, vor. Dies gilt ebenso für die Bereiche mit im Vergleich dazu geringen lokalen Umformgraden und Härtewerten. Vor diesem Hintergrund wird demzufolge angenommen, dass die Eignung der auf Basis des validierten numerischen Modells ermittelten Kalibrierkurven für die Identifikation der Reibfaktoren gegeben ist.

4.3 Anlage zur experimentellen Nietherstellung

Für die experimentelle Nietherstellung wird die Universalprüfmaschine SchenckTrebel RM400 der Firma Schenck Trebel Corporation mit einer Maximalkraft von 400 kN in Kombination mit der Prüfsoftware testXpert® II der Firma Zwick Roell genutzt. Die Versuche werden wegge-regelt durchgeführt. Im Zusammenhang mit der hohen Kaltverfestigung des druckaufgestickten Stahls 1.3815 ergibt sich eine hohe Werkzeugbeanspruchung während der Umformung. Dementsprechend wird ein für den Einsatz des druckaufgestickten Stahls als Nietwerkstoff geeignetes Werkzeug konzipiert, welches in die Universalprüfmaschine integriert wird. Das erarbeitete Werkzeugkonzept wird im nachfolgenden Kapitel 5 im Detail beschrieben.

4.4 Methoden zur Analyse des Nietherstellprozesses

Um den Umformprozess zur Herstellung der Niete umfassend zu analysieren und ein tiefergehendes Prozessverständnis zu ermöglichen, wird der Nietherstellprozess sowohl auf Basis analytischer Methoden als auch mittels numerischer Simulation analysiert, worauf in den folgenden Abschnitten eingegangen wird.

4.4.1 Analytische Methoden

Im Rahmen dieser Arbeit wird unter anderem untersucht, welchen Einfluss die Prozesstemperatur während der Nietherstellung auf die erreichte Bauteilgeometrie nach der Umformung hat. Hierbei muss nicht nur der Temperatureinfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Nietwerkstoffs berücksichtigt werden, sondern beispielsweise auch die durch erhöhte Prozesstemperaturen bedingte Wärmeausdehnung des Umformwerkzeugs. Unterschiede hinsichtlich der erzielten Bauteilgeometrie können demzufolge auf unterschiedliche Ursachen zurückgeführt werden, welche in Zusammenhang mit der gewählten Umformtemperatur stehen. Diese Ursachen müssen differenziert werden, um den Anteil des Temperatureinflusses auf die Umformbarkeit des Nietwerkstoffs zu identifizieren und von den übrigen temperaturbedingten Effekten abzugrenzen. Hierfür wird eine Ursache-Effekt-Analyse durchgeführt, welche auf eine Kombination aus analytischen Berechnungsansätzen und experimentellen Untersuchungen gestützt ist. Diese dient nicht nur der Schaffung eines grundsätzlichen Verständnisses für die auftretenden Temperatureinflüsse und -effekte, sondern auch der Abschätzung des anteiligen Temperatureinflusses auf die

Umformbarkeit. Für die Quantifizierung des jeweiligen Einflusses der verschiedenen temperaturinduzierten Ursachen werden die im Folgenden aufgeführten grundlegenden Formeln angewandt.

Das Hookesche Gesetz gemäß Gleichung 1 beschreibt den linearen Zusammenhang zwischen der Spannung σ und der Dehnung ε im elastischen Bereich [69]. Hieraus ergibt sich auch der Zusammenhang zwischen dem Elastizitätsmodul E eines Werkstoffs, der Kraft F , der Ausgangslänge l_0 , des Ausgangsquerschnitts A_0 und der Längenänderung Δl .

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \Rightarrow E = \frac{F \cdot l_0}{A_0 \cdot \Delta l} \quad (1)$$

Die elastische Nachgiebigkeit der Presse kann einen Einfluss auf den Umformprozess und das Umformergebnis haben, weshalb die Maschinenauffederung eine wichtige Rolle in Bezug auf die am Ende des Umformprozesses erreichte Bauteilgeometrie spielt [140]. Zwischen der Steifigkeit C , der aufgebrachten Kraft F und der resultierenden Längenänderung Δl gilt im Allgemeinen die Beziehung entsprechend Gleichung 2 [70]. Unter der vereinfachenden Annahme, dass der Einfluss der Anfangsverlagerung, der Kippung und der horizontalen Verlagerung gegenüber der vertikalen Auffederung vernachlässigbar sind, kann auf dieser Basis annäherungsweise eine Abschätzung der Auffederung getroffen werden.

$$C = \frac{F}{\Delta l} \quad (2)$$

Bei der Umformung bei erhöhter Prozesstemperatur treten Wärmeausdehnungseffekte und nach dem Umformprozess folglich auch Abkühlungseffekte auf. Eine temperaturbedingte Längenänderung Δl kann anhand von Gleichung 3 in Abhängigkeit von der Referenzlänge l_0 , dem Wärmeausdehnungskoeffizient α und der Temperaturdifferenz ΔT berechnet werden, wobei l_0 in der Regel bei 0 °C oder 20 °C bestimmt wird [141].

$$\Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (3)$$

4.4.2 Numerische Simulation

Der Einsatz der numerischen Simulation mithilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) für die Analyse von Massivumformprozessen und für die Auslegung von Umformwerkzeugen ist weit verbreitet. Die numerische Simu-

lation ermöglicht nicht nur die Untersuchung des Werkstoffflusses während der Umformung und der resultierenden Bauteileigenschaften, sondern auch eine durchgängige Spannungsanalyse zur Evaluierung der Werkzeugbeanspruchung entlang des gesamten Prozesses, vorausgesetzt, dass die Werkzeugkomponenten nicht starr modelliert werden. Bei der FEM handelt es sich um ein numerisches Näherungsverfahren, wobei der zu untersuchende Körper oder Bereich in eine endliche Anzahl an Elementen aufgeteilt wird [142]. Dementsprechend wird bei der FE-Simulation zunächst die Diskretisierung der CAD-Modelle des Werkstücks und gegebenenfalls der Werkzeugkomponenten durch den Präprozessor durchgeführt, ehe die Berechnung durch den Solver und abschließend eine Visualisierung der Ergebnisse mithilfe des Postprozessors erfolgt [142].

Für die numerische Simulation des Nietherstellprozesses im Rahmen dieser Arbeit wird die Simulationssoftware *simufact.forming* von *Simufact Engineering* in der Version 14.0.1 genutzt. Neben der Analyse der erzielten Nieteigenschaften nach der Umformung liegt ein weiterer Fokus auf der Untersuchung der in den Werkzeugaktivteilen auftretenden Spannungen, um die Machbarkeit der Nietherstellung mit dem druckaufgestickten Stahl 1.3815 im Hinblick auf die Beanspruchbarkeit des Umformwerkzeugs sicherzustellen. Aus diesem Grund wird eine gekoppelte Werkstück-Werkzeug-Simulation genutzt. Da der Aufbau des numerischen Modells zur Abbildung des Nietherstellprozesses mit der Prozess- und Werkzeugauslegung einhergeht, wird dieser im Detail im nachfolgenden Kapitel 5 erläutert. Die Validierung des numerischen Modells erfolgt anhand des Vergleichs von Kraft-Weg-Daten und der Bauteilgeometrie aus Experiment und Simulation sowie anhand der Gegenüberstellung der erzielten Härteverteilung von experimentell hergestellten Nieten und der simulativ ermittelten Umformgradverteilung.

4.5 Untersuchung der umgeformten Bauteile

Im Hinblick auf die hohen Anforderungen an die Festigkeit von Nieten, welche für das Fügen hochfester Stähle geeignet sind, spielen die Verfestigung und die erzielbare Härte für den Einsatz von Nietwerkstoffen eine wesentliche Rolle. Dementsprechend werden Härtemessungen durchgeführt, um die Härteverteilung in den umgeformten Bauteilen zu ermitteln. Für die Evaluierung der Einflussfaktoren auf den Nietherstellprozess und die Niete muss des Weiteren die beim Umformen erreichte Nietgeometrie, welche auch mit dem erreichbaren Füllgrad der Matrize zusammenhängt, berücksichtigt werden, da geometrische Parameter wie zum Beispiel der

Nietkopfdurchmesser relevant für das Fügen sind und beispielsweise die Verbindungsfestigkeit beeinflussen können. Die Erfassung der geometrischen Parameter erfolgt mithilfe optischer 3D Messungen. In Bezug auf die Analyse werkstoffseitiger Einflussgrößen ist die Untersuchung des lokalen Stickstoffgehalts von Bedeutung. Auf diese Weise können Zusammenhänge mit weiteren Einflussfaktoren wie der Umformtemperatur und den resultierenden Bauteileigenschaften wie der Härte detektiert werden. Für die Analyse des Stickstoffgehalts wird die energiedispersive Röntgenspektroskopie (EDX) eingesetzt. Die genannten Messverfahren werden im Folgenden vorgestellt.

4.5.1 Härtemessungen

Die Untersuchung der Härte der umgeformten Bauteile stellt einen wichtigen Baustein dar, um das erforderliche Prozessverständnis zu erlangen, welches als Basis für die Beeinflussung der Nieteigenschaften dient. Die Analyse der Härte beispielsweise von bei unterschiedlichen Prozessstemperaturen umgeformten Nieten erlaubt es, Rückschlüsse bezüglich des Einflusses der Temperatur auf die Härteverteilung zu ziehen. Daher werden Mikrohärtemessungen nach DIN EN ISO 14577-1 [139] unter Nutzung des Mikrohärtemessgeräts Fischerscope® HM2000 der Firma Helmut Fischer durchgeführt. Zu diesem Zweck werden die zu untersuchenden Proben präpariert. Die Proben werden zunächst kalteingebettet und bis zur Probenmitte geschliffen. Nach dem Planparallelschleifen werden die eingebetteten Proben poliert. Für die Härtemessung wird eine Vickers-Pyramide als Eindringkörper verwendet. Die Vickers-Härte wird entsprechend DIN EN ISO 6507-1 [143] auf Basis des Diagonaleindrucks ermittelt. Dies geschieht auf Basis der Fläche des Eindrucks, welche mittels der Prüfsoftware WIN-HCU aufgrund der bekannten Eindringkörpergeometrie anhand der maximalen Eindringtiefe ermittelt wird. Gemäß [139] ist eine Umschlüsselung der Eindringhärte nach der Vickershärte durch Anwendung einer Umwertefunktion möglich, weshalb in dieser Arbeit analog zu [139] die Vickershärte angegeben wird. Da der Abstand der Mittelpunkte zweier Eindrücke mindestens dem dreifachen Mittelwert der beiden Diagonalenlängen eines Eindrucks entsprechen muss [143], wird eine Prüfkraft von 200 mN gewählt, um eine ausreichend hohe Auflösung der Messung zu erreichen. Für jede Messung werden zwei Messfelder festgelegt, wie in Bild 5 a) dargestellt, wobei sich diese bezüglich des Abstands der Messpunkte in x- und y-Richtung unterscheiden. In derjenigen Richtung, in welcher eine höhere Gradierung der Härte zu erwarten ist, wird der erforder-

liche Mindestabstand gewählt, während in der anderen Richtung ein größerer Abstand genutzt wird, um die Messzeit zu verringern. Die Aufbringungszeit sowie die Zeit für die Rücknahme der Prüfkraft betragen jeweils 20 s, die Haltezeit der Prüfkraft wird auf 5 s festgelegt, um Setzvorgänge zu berücksichtigen.

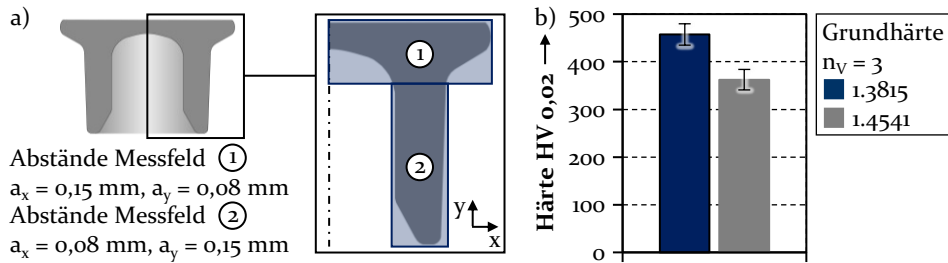


Bild 5: a) Messfelder unter Angabe des jeweiligen Abstands der Messpunkte, b) Grundhärte von 1.3815 und 1.4541

Die Grundhärte des druckaufgestickten Stahls 1.3815 von $457 \text{ HV } 0,02 \pm 22 \text{ HV } 0,02$ und des Edelstahls 1.4541 von $362 \text{ HV } 0,02 \pm 21 \text{ HV } 0,02$, wie in Bild 5 b) gezeigt, wurden an nicht umgeformten Drahtabschnitten ermittelt. Ein Vergleich der mittleren Härte unterschiedlicher, umgeformter Proben ermöglicht eine grundsätzliche Einordnung der durch die Kaltverfestigung beim Umformen erreichbaren Härte. Dies gilt vor allem für den Vergleich der mittleren Härte von Nieten aus druckaufgesticktem Stahl mit der Härte konventioneller Nieten, welche aufgrund des Vergütens homogene Eigenschaften aufweisen. In Anbetracht der Tatsache, dass die Nieten aus druckaufgesticktem Stahl sich im Gegensatz zu handelsüblichen Nieten vornehmlich durch ihre gradierten Eigenschaften auszeichnen, ist auch die Bewertung der Härteverteilung von Interesse. Aus diesem Grund werden verschiedene Bereiche des Niets festgelegt, für welche jeweils der Mittelwert der lokalen Härtewerte berechnet wird. Die Gründe für die Wahl dieser Bereiche leiten sich von den Anforderungen an die Nieten ab, welche in Kapitel 5 diskutiert werden, und werden dementsprechend in diesem Zusammenhang im nachfolgenden Kapitel erläutert. Durch den Vergleich der mittleren Härte in den festgelegten Bereichen können Unterschiede hinsichtlich der lokalen Härte in diesen Bereichen identifiziert werden, um darauf basierend die Gradierung der Härte zu beurteilen. Überdies können durch die Gegenüberstellung der Bereiche von Nieten, welche beispielsweise bei differierenden Temperaturen umgeformt wurden, Unterschiede bezogen auf die Härteverteilung aufgezeigt und dem jeweiligen Einflussfaktor als Effekt zugeordnet werden.

4.5.2 Optische 3D Messungen

Die Nietgeometrie spielt eine wichtige Rolle für das Fügen mittels Halbhohlstanznieten, weshalb auch die erreichbare Formfüllung in der Matrice beim Umformen relevant ist. Auswirkungen von Prozessparametern wie der Umformtemperatur auf geometrische Parameter wie beispielsweise den Nietkopfdurchmesser müssen daher anhand der Untersuchung der umgeformten Bauteile identifiziert werden. Für die Erfassung der im Umformprozess erreichten Bauteilgeometrie wird das optische 3D Messsystem InfiniteFocus XL200 G5 der Firma Bruker Alicona eingesetzt. Das Messsystem InfiniteFocus basiert auf dem berührungslosen, zerstörungsfreien Messprinzip der Fokusvariation, wobei Licht von einer Weißlichtquelle mithilfe des Objektivs fokussiert wird, sodass durch das Bündeln der reflektierten Lichtstrahlen nur ein gewisser Bereich des zu untersuchenden Bauteils scharf abgebildet wird und die ganzheitliche Erfassung der Bauteiltopographie mittels vertikaalem Verfahren des Messkopfs erfolgt [144]. Aufgrund der neben dem horizontalen Verfahren des Messkopfs möglichen variablen Ausrichtung des Messobjekts durch die Nutzung unterschiedlicher Kippwinkel und die Rotation um 360° kann die Bauteilgeometrie mittels Fusionieren der Messdaten somit vollständig erfasst werden. Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen zur Untersuchung der Bauteilgeometrie wird ein Objektiv mit 10-facher Vergrößerung verwendet. Die Analyse der 3D Messdaten erfolgt mithilfe der Software GOM Inspect des Herstellers GOM in der Version 2019. Auf diese Weise werden Unterschiede hinsichtlich der erreichbaren Nietgeometrie in Abhängigkeit von Prozessparametern wie der Umformtemperatur ermittelt.

4.5.3 Energiedispersive Röntgenspektroskopie

Zu einem grundlegenden Prozessverständnis für das Umformen von Halbhohlstanznieten aus druckaufgesticktem Stahl trägt die Analyse des lokalen Stickstoffgehalts bei. Hierdurch kann beispielsweise überprüft werden, ob sich hohe lokale Härtewerte auf einen hohen lokalen Stickstoffgehalt zurückführen lassen. Dies ermöglicht eine Verknüpfung von prozessseitigen Einflussfaktoren und mechanischen Bauteileigenschaften mit werkstoffseitigen Einflussgrößen. Für die Ermittlung des lokalen Stickstoffgehalts werden EDX-Analysen mithilfe des Rasterelektronenmikroskops (REM) Merlin Gemini 2 von Carl Zeiss mit 2000-facher Vergrößerung durchgeführt. Die EDX-Messmethode zur Bestimmung der Elementzusammensetzung basiert darauf, dass durch die Einbringung von Primärelektronen im REM Elektronen aus inneren Energieniveaus freigesetzt und die

entstehenden Lücken durch Elektronen aus äußeren Energieniveaus besetzt werden, wobei je nach Element spezifische Röntgenstrahlung emittiert wird [145]. Durch das Detektieren dieser Röntgenstrahlung ist prinzipiell eine quantitative Bestimmung der Elemente im gemessenen Bereich der Probe möglich ist, da zwischen der Intensität der Röntgenstrahlung und der Konzentration eines Elements ein proportionaler Zusammenhang anzunehmen ist [76]. Da Stickstoff sehr flüchtig ist, ist die Quantifizierung des Stickstoffgehalts allerdings oftmals schwierig und mit einer großen Messunsicherheit verbunden. Nichtsdestotrotz wird auf Basis der gemessenen Konzentration eine qualitative Bewertung von möglicherweise auftretenden Veränderungen des lokalen Stickstoffgehalts bei unterschiedlichen Proben ermöglicht.

5 Auslegung des Nietherstellprozesses

Um die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Einflüsse bei der Nietherstellung einordnen und die Einflussfaktoren im Zusammenhang mit der Beeinflussung der Nieteigenschaften bewerten zu können, ist die Definition von grundlegenden Anforderungen an für das Fügen hochfester Stähle geeignete Niete erforderlich, worauf zu Beginn dieses Kapitels näher eingegangen wird. Eine erste Beurteilung der Einflussgrößen auf die grundlegenden Umformeigenschaften der untersuchten potentiellen Nietwerkstoffe wird auf Basis der dargestellten Ergebnisse der Charakterisierung ermöglicht, wobei zudem eine Festlegung des untersuchten Temperaturbereichs erfolgt. Die ganzheitliche Analyse des Nietherstellprozesses und der umgeformten Niete basiert sowohl auf der numerischen Analyse, wofür ein FE-Modell erarbeitet wird, dessen Aufbau und Validierung im Rahmen dieses Kapitels dargelegt werden, als auch auf experimentellen Untersuchungen mittels eines auf Basis der numerisch gestützten Auslegung konzipierten Umformwerkzeugs, welches ebenfalls vorgestellt wird.

5.1 Grundlegende Anforderungen an Nitelemente

Für die Realisierung von Leichtbaukonzepten ist das Fügen von Aluminiumlegierungen und hochfesten Stählen essentiell [24]. Derartige Materialkombinationen sind mit Herausforderungen für das Halbhohlstanznieten verbunden, wie es im Stand der Technik erläutert ist. Vor diesem Hintergrund wird eine anspruchsvolle Fügeaufgabe für die Nutzung der im Rahmen dieser Arbeit ausgelegten Niete aus hochverfestigenden Werkstoffen festgelegt. Mittels der Niete sollen unterschiedliche Materialkombinationen aus der Aluminiumlegierung EN AW-5083 und dem hochfesten Dualphasenstahl HCT780X (1.0943) gefügt werden können. Die beiden Blechwerkstoffe werden mit einer Blechdicke von 1,5 mm eingesetzt. Eine Übersicht der mechanischen Eigenschaften ist Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften der Fügepartner, ermittelt auf Basis von Zugversuchen mit $n_V = 5$ und in 0° zur Walzrichtung

Werkstoff	$R_{p0,2}$ in MPa	R_m in MPa
EN AW-5083	$157,3 \pm 1,0$	$291,5 \pm 0,6$
HCT780X	$564,1 \pm 2,2$	$860,8 \pm 1,3$

Bei den zu fügenden Materialkombinationen im Rahmen der zuvor genannten Fügeaufgabe handelt es sich bei Materialkombination 1 um den

beidseitigen Einsatz von HCT780X, während Materialkombination 2 EN AW-5083 auf der Stempelseite und HCT780X auf der Matrizen­seite umfasst. Insbesondere der matrizen­seitige Einsatz des hochfesten Stahls stellt eine Herausforderung dar. Darüber hinaus wurde in [25] gezeigt, dass die Fügbarkeit von EN AW-5083 und HCT780X bei unterschiedlicher Anordnung der Fügepartner mithilfe desselben Niettyps konventioneller Niete nicht gegeben ist. Wichtige Voraussetzungen, um die genannte Fügeaufgabe erfüllen zu können, sind eine geeignete Nietgeometrie und mechanische Nieteigenschaften, worauf im Folgenden näher eingegangen wird.

Nietgeometrie

Eine für das Fügen unterschiedlicher Materialkombinationen aus EN AW-5083 und HCT780X geeignete Nietgeometrie wurde federführend vom Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik der Universität Paderborn erarbeitet und in [25] vorgestellt. Die neuartige Nietgeometrie ist in Bild 6 a) im Vergleich zum konventionellen P-Niet und HD2-Niet, welche als Basis für die Erarbeitung der neuen Nietgeometrie dienten, gezeigt.

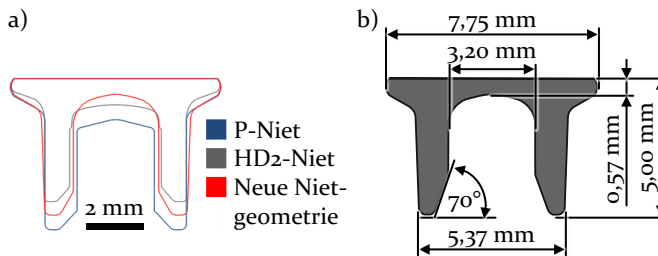


Bild 6: Neu erarbeitete Nietgeometrie nach [25]: a) Neue Geometrie im Vergleich mit Geometrien konventioneller Niettypen, b) Geometrische Parameter der neuen Nietgeometrie

Im Rahmen der numerischen Analyse des Nietherstellprozesses geht aus Untersuchungen in [146] hervor, dass durch eine Vergrößerung des Schneidwinkels von 60° bei der neu erarbeiteten Nietgeometrie auf 70° eine Reduzierung der beim Umformen im Werkzeug auftretenden Spannungen erreicht wird. Die Vergrößerung des Schneidwinkels führt zu einem begünstigten Werkstofffluss bei der Ausformung des Nietfußes, sodass die erforderliche Umformkraft und infolgedessen auch die Werkzeugbeanspruchung verringert wird. Die neu erarbeitete Nietgeometrie mit einem adaptierten Schneidwinkel von 70° , wie sie Bild 6 b) zu entnehmen ist, wird daher im Rahmen dieser Arbeit als Idealgeometrie in Bezug auf die Eignung für das Fügen der verschiedenen Materialkombinationen aus EN AW-5083 und HCT780X festgelegt. Diese Idealgeometrie wird im Speziellen für die

Bewertung der Einflüsse auf die bei der Umformung erreichten geometrischen Parameter der Niete herangezogen, welche auf der Identifikation der Abweichungen der erzielten Nietgeometrie nach der Umformung von der Idealgeometrie basiert. Für das Fügen relevante geometrische Parameter, auf welche hierbei der Fokus gelegt wird, stellen der Kopfdurchmesser, die Kopfdicke und die Nennlänge dar. Ein zu geringer Kopfdurchmesser kann zu einer Reduzierung der Verbindungsfestigkeit führen. Die Kopfdicke ist relevant, da sie mit der Bohrungstiefe verknüpft ist und da der Butzen des stempelseitigen Blechs nach dem Schneidvorgang im Inneren des Niets verbleibt. Eine zu geringe Nennlänge kann gerade beim Einsatz von hochfestem Stahl auf der Matrizenseite ein erschwertes Aufspreizen zur Folge haben [43] und demnach zu einer verringerten Hinterschnittausbildung und Verbindungsfestigkeit führen. Ist die Nennlänge zu groß, bestehen Risiken hinsichtlich des Ausknickens oder einer übermäßigen Stauchung des Nietschafts [60], einer Verringerung der Restbodendicke [59] und letztlich auch des Versagens des matrizenseitigen Blechs durch Bruch [43].

Mechanische Eigenschaften der Niete

Zu den beim Fügen von hochfestem Stahl charakteristischen Fehlern, die in Bild 7 a) veranschaulicht sind, zählen eine über das übliche Maß hinausgehende Stauchung des Nietschafts [13], wobei im Extremfall das Durchschneiden des stempelseitigen Blechs verhindert wird, das Auftreten von Brüchen im Niet [31] sowie vor allem beim matrizenseitigen Einsatz von hochfestem Stahl eine unzureichende Ausbildung des Hinterschnitts [24] infolge des erschwerten Aufspreizens [41]. Um den Herausforderungen beim Fügen hochfester Stähle zu begegnen, stellen die mechanischen Eigenschaften der Niete neben der Nietgeometrie einen weiteren Schlüsselfaktor dar. Auf Basis der charakteristischen Fehler lassen sich darüber hinaus potentielle Gegenmaßnahmen zur Vermeidung dieser Fehler erschließen, welche sich auf die Einstellung von gradierten mechanischen Eigenschaften der Niete beziehen, wie es in Bild 7 b) verdeutlicht ist. Hieraus wurde in Zusammenarbeit mit dem Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik eine Kombination von Anforderungen hinsichtlich der lokalen Festigkeit und Härte in unterschiedlichen Bereichen im Niet abgeleitet, wie in Bild 7 c) zusammengefasst, wobei fünf Bereiche A bis E im Niet festgelegt werden, auf welchen der Fokus bei der Analyse der Härte von experimentell umgeformten Nieten liegt.

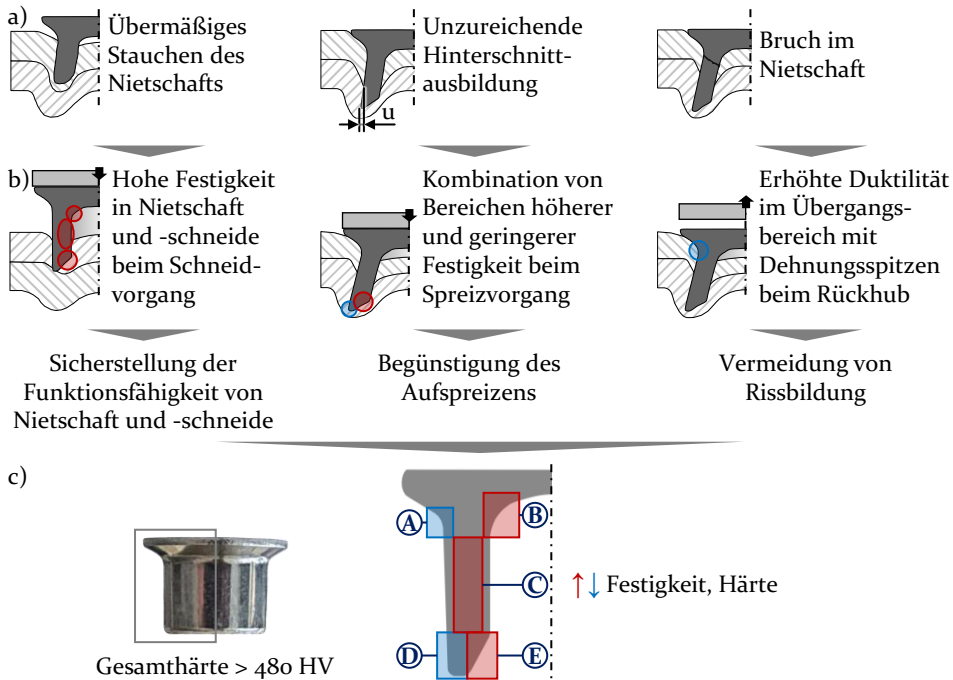


Bild 7: a) Typische Fehler beim Fügen hochfester Stähle nach [24], b) Graduierte Eigenschaften zur Vermeidung der typischen Fehler, c) Abgeleitete kombinierte Anforderungen an die lokale Festigkeit und Härte nach [147]

Dabei wird als Grundvoraussetzung angenommen, dass das gesamte Härteniveau der Niete die Härte konventioneller Niete der Härteklasse H4 von $480 \text{ HV}_{10} \pm 30 \text{ HV}_{10}$ [25] überschreiten muss. Da im äußeren Übergangsbereich vom Nietschaft zum Nietkopf beim Stempelrückhub beim Fügen Spannungs- und Dehnungsspitzen auftreten und ein hohes Risiko der Rissbildung vorliegt [25], liegt im Bereich A der Fokus auf der Sicherstellung einer ausreichenden Duktilität, weshalb eine vergleichsweise geringe Härte vorausgesetzt wird. Der Nietschaft unterliegt vor allem beim Schneiden des stempelseitigen Blechs einer hohen Beanspruchung. In [148] wird der Nietschaft anhand der Analyse von Fügeverbindungen mittels Neutronenbeugung als Bereich identifiziert, in welchem höhere Eigenspannungen als beispielsweise im Nietkopf vorliegen. Dementsprechend besteht vor allem beim Fügen von hochfestem Stahl die Gefahr des übermäßigen Stauchens [13] oder auch Ausknickens [67] des Nietschafts. Im inneren Übergangsbereich B sowie im Bereich C ist vor diesem Hintergrund eine vergleichsweise hohe Härte erforderlich. Auf diese Weise soll ein übermäßiges Stauchen des Nietschafts, welches außerdem eine Verringerung des Hinterschnitts

zur Folge haben kann oder die Ausbildung eines qualitätsgerechten Hinterschnitts sogar verhindern kann, vermieden werden. Das Erreichen einer hohen Festigkeit in den inneren Randbereichen des Nietschafts ist auch deshalb relevant, weil gemäß der numerischen Spannungsanalyse des Fügeprozesses in [25] in diesen Bereichen hohe Spannungen von über 1800 MPa beim Rückhub auftreten können. Beim Schneidvorgang muss nicht nur der Nietschaft, sondern auch der Nietfuß intakt bleiben. Dies gilt vor allem für die Nietschneide, welche auch beim Spreizvorgang eine wichtige Rolle spielt [147]. Der Schneidwinkel beeinflusst neben dem Schneiden auch das Aufspreizen [60]. Damit die Funktionsfähigkeit der Nietschneide in Bezug auf das Einleiten des Spreizvorgangs nach dem Durchschneiden des stempelseitigen Blechs sichergestellt ist, soll der Bereich E ebenfalls ein vergleichsweise hohes Härteniveau aufweisen. Um das Aufspreizen und die Hinterschnittausbildung zu begünstigen, wird darüber hinaus im Nietfuß die Kombination aus einer geringeren Härte im Bereich D mit einer höheren Härte im Bereich E angestrebt. Insgesamt bilden die abgeleiteten Anforderungen an die Härteverteilung im Niet die Grundlage, um eine maßgeschneiderte Gradierung der Niethärte entsprechend den Anforderungen beim Fügen zu erzielen.

Zusammenfassung der Anforderungen an die Niete

Zusammenfassend werden im Hinblick auf die anspruchsvolle Fügeaufgabe nachfolgende grundlegende Anforderungen an die Niete gestellt, um die prinzipielle Eignung für das Fügen verschiedener Materialkombinationen mit hochfestem Stahl zu gewährleisten:

- Aufweisen einer Nietgeometrie, welche das Fügen unterschiedlicher Materialkombinationen aus Aluminiumlegierungen und hochfesten Stählen mit demselben Niettyp ermöglicht;
- Aufweisen gradierter mechanischer Eigenschaften entsprechend den Anforderungen an die Niete beim Fügen;
- Erreichen einer höheren Niethärte als konventionelle Niete der Härteklasse H4 im vergüteten Zustand, womit die Anforderung Niethärte > 480 HV gilt.

5.2 Charakterisierung der eingesetzten Nietwerkstoffe

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Charakterisierung der potentiellen Nietwerkstoffe 1.3815 und 1.4541 vorgestellt. Hierbei steht die Ermittlung der Fließgrenze $R_{p0,2}$, des Verfestigungsexponen-

ten n und der maximalen Fließspannung $k_{f,max}$ im Vordergrund. Die Untersuchungen umfassen die Analyse des Einflusses der Umformtemperatur auf die Werkstoffeigenschaften sowohl bei einstufiger als auch bei mehrstufiger Umformung. Zusätzlich wird auf den Einfluss der Umformgeschwindigkeit und in diesem Zusammenhang auf die Wechselwirkung mit der Umformtemperatur eingegangen. Da die Reibung eine wichtige Rolle bei der Umformung spielt, werden abschließend die Untersuchungsergebnisse bezüglich des Temperatureinflusses auf den Reibfaktor m dargelegt. Eine Übersicht der durchgeführten Untersuchungen ist in Tabelle 3 gegeben.

Tabelle 3: Übersicht der Untersuchungen zur Werkstoffcharakterisierung unter Berücksichtigung des Einflusses der Umformtemperatur T und der Umformgeschwindigkeit v

Untersuchte Einflussgröße	Untersuchte Parameter	Charakterisierungsversuch	T	v
T	$R_{p0,2}, n, k_{f,max}$	Zylinderstauchversuch	x	o
Wechselwirkung T und Vorverfestigung	$R_{p0,2}, k_{f,max}$	Zweistufiger Zylinderstauchversuch	x	o
v	$R_{p0,2}, n, k_{f,max}$	Zylinderstauchversuch	o	x
Wechselwirkung T und v	$R_{p0,2}, n, k_{f,max}$	Zylinderstauchversuch	x	x
T	m	Ringstauchversuch	x	o

o $\triangleq$ konstant x $\triangleq$ variiert

Für die Charakterisierung der potentiellen Nietwerkstoffe wird eine Eingrenzung des untersuchten Temperaturbereichs vorgenommen. Bei austenitischen nichtrostenden Stählen kann bereits bei relativ geringer Erwärmung eine Reduzierung der Fließspannung erreicht werden [149]. Ein im Hinblick hierauf geeigneter Temperaturbereich ist vom Werkstoff abhängig. Da bei unlegierten Stählen Blausprödigkeit auftreten kann, sollten in diesem Fall Temperaturen oberhalb von 500 °C gewählt werden, während austenitische nichtrostende Stähle davon nicht betroffen sind [77]. Entscheidend im Hinblick auf die hohen Anforderungen an die Festigkeit von für das Fügen hochfester Stähle geeigneten Nieten ist, dass die Rekristallisationstemperatur nicht überschritten wird, um eine dadurch bedingte Verringerung der Festigkeit zu vermeiden. Die Rekristallisationstemperatur entspricht per definitionem der 0,4-fachen bis 0,5-fachen Schmelztemperatur des Werkstoffs [69]. Die Soliduslinie austenitischer Stähle mit 18 % Cr, 18 % Mn und 0,75 % N liegt oberhalb von 1400 °C [87]. Dementsprechend wird eine Temperatur von 600 °C als obere Grenze des potentiellen Temperaturbereichs zur Nietherstellung festgelegt. Als untere Grenze des untersuchten Temperaturbereichs wird Raumtemperatur gewählt. Eine

weitere Eingrenzung des für die Nietherstellung als zielführend erachteten Temperaturbereichs erfolgt im Rahmen der nachfolgenden Diskussion der Charakterisierungsergebnisse.

Einfluss der Umformtemperatur auf die Werkstoffeigenschaften bei einstufiger Umformung

Um den Einfluss der Umformtemperatur auf die Umformeigenschaften des druckaufgestickten Stahls 1.3815 grundlegend zu untersuchen, werden Zylinderstauchversuche bei Raumtemperatur sowie im Temperaturbereich von 100 °C bis 600 °C in Schritten von 100 °C durchgeführt. Die aus den Versuchsdaten abgeleiteten Fließkurven sind in Bild 8 dargestellt.

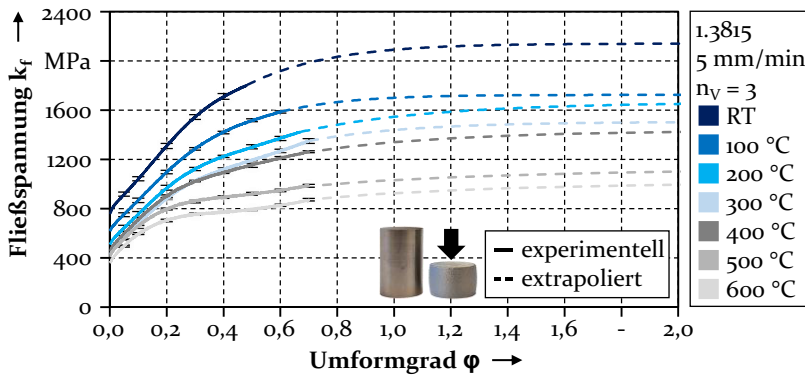


Bild 8: Temperatureinfluss auf die Fließkurve von 1.3815

Basierend auf der Extrapolation der experimentell ermittelten Fließkurven mithilfe des Ansatzes nach Hockett und Sherby [133] ist bei der Umformung bei Raumtemperatur für Umformgrade über 0,8 ein Fließspannungsniveau oberhalb von 2000 MPa zu erwarten, wobei ab einem Umformgrad von etwa 1,6 ein Sättigungsniveau von knapp 2140 MPa erreicht wird. Im untersuchten Temperaturbereich kommt es mit zunehmender Temperatur zu einer Abnahme des Fließspannungsniveaus. Dass eine Temperaturerhöhung bei Metallen generell zu einer Verringerung der Fließspannung im Vergleich zu Raumtemperatur führt, stellt einen bekannten Zusammenhang dar [150], welcher vor allem auf die höhere Beweglichkeit der Versetzungen zurückzuführen ist [69]. Entsprechend den Untersuchungsergebnissen ist zunächst davon auszugehen, dass die bei der Nietherstellung erforderliche Umformkraft mit zunehmender Prozesstemperatur verringert wird, wodurch zudem eine Reduzierung der im Umformwerkzeug auftretenden Spannungen erreicht werden kann. Allerdings darf die Verände-

rung der Reibungsbedingungen in Abhängigkeit von der Prozesstemperatur und ein potentiell erhöhter Kraftbedarf aufgrund erhöhter Reibung nicht außer Acht gelassen werden.

Bei den ermittelten Fließkurven fällt auf, dass die verhältnismäßig größten Reduzierungen des Fließspannungsniveaus zwischen zwei aufeinanderfolgenden Temperaturstufen zum einen zwischen 400 °C und 500 °C und zum anderen zwischen Raumtemperatur und 100 °C erkennbar sind, obwohl die Temperaturschrittweite im letztgenannten Fall sogar am geringsten ist. Erklärt werden kann dieser Effekt dadurch, dass bei 100 °C im Gegensatz zu Raumtemperatur eine zusätzlich thermisch aktivierte Bewegung der Versetzungen eintritt, während dies beispielsweise für den Vergleich von 100 °C und 200 °C eine untergeordnete Rolle spielt, da die temperaturbedingte Erhöhung der Beweglichkeit der Versetzungen für beide Temperaturstufen zutrifft. Ab 500 °C laufen möglicherweise thermisch aktivierte Erholungsvorgänge ab. Erholungsvorgänge sind temperaturabhängig und mit einem Abbau der Versetzungsdichte verbunden [69]. Es ist anzunehmen, dass aus diesem Grund eine Temperaturerhöhung von 400 °C auf 500 °C zu einer vergleichsweise größeren Reduzierung der Fließspannung führt als beispielsweise eine Temperaturerhöhung von 300 °C auf 400 °C. Im Zusammenhang mit dem Temperatureinfluss auf die Fließspannung steht auch die Veränderung der Fließgrenze in Abhängigkeit von der Umformtemperatur, wie in Bild 9 gezeigt.

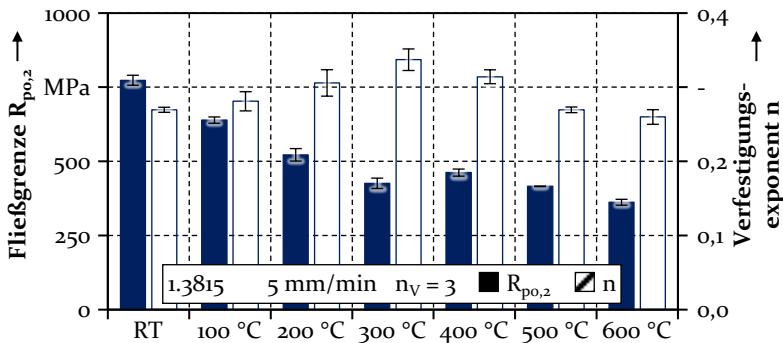


Bild 9: Einfluss der Umformtemperatur auf die Fließgrenze und den Verfestigungsexponenten von 1.3815

Im Temperaturbereich von Raumtemperatur bis 300 °C nimmt die Fließgrenze mit zunehmender Temperatur ab. Die Fließgrenze bei Raumtemperatur liegt bei 773,6 MPa ± 16,9 MPa. Bereits bei 200 °C ist die Fließgrenze von 522,1 MPa ± 21,1 MPa um über 30 % geringer im Vergleich zu Raumtemperatur. Bei 300 °C wird eine Verringerung um mehr als 40 % verglichen

mit Raumtemperatur erzielt. Im Rahmen einer weiteren Temperaturerhöhung auf 400 °C ist eine Zunahme der Fließgrenze im Vergleich zu 300 °C zu verzeichnen. Als Erklärung für dieses lokale Minimum bei 300 °C kann die erhöhte Beweglichkeit der Stickstoffatome bei erhöhten Temperaturen herangezogen werden. Bei Temperaturen von mehr als 300 °C führt die Stickstoffdiffusion dazu, dass sich die Stickstoffatome an die Versetzungen anheften, was mit einem erhöhten Kraftbedarf für die Versetzungsbewegung und dementsprechend mit einem Anstieg der Fließgrenze verbunden ist. In [100] ist dieser Vorgang ebenfalls als potentielle Ursache für vergleichbare Effekte bei der Untersuchung unterschiedlicher hochstickstofflegierter Stähle genannt. Zwischen 400 °C und 600 °C nimmt die Fließgrenze mit zunehmender Temperatur tendenziell wieder ab, wobei die relative Reduzierung zwischen zwei Temperaturstufen geringer ausfällt als im Bereich von Raumtemperatur bis 300 °C. Ähnliche Zusammenhänge sind in [96] für verschiedene stickstofflegierte Stähle dokumentiert. Es ist naheliegend, dass das Anheften der Stickstoffatome an die Versetzungen der erhöhten Beweglichkeit der Versetzungen entgegenwirkt, wodurch sich ein geringerer Temperatureinfluss auf die Fließgrenze oberhalb von 300 °C ergibt.

Neben der Fließgrenze ist der zur Beschreibung der Verfestigung genutzte Verfestigungsexponent in Abhängigkeit von der Umformtemperatur ebenfalls in Bild 9 dargestellt. Für die erreichbaren mechanischen Eigenschaften der Nitelemente ist die Verfestigung des druckaufgestickten Stahls entscheidend. Eine Festigkeits- und Härtesteigerung basierend auf der Verfestigung beim Umformen ist insbesondere im Hinblick auf die herausfordernde Fügeaufgabe mit hochfestem Stahl als Fügepartner zielführend. Der Verfestigungsexponent bei Raumtemperatur beträgt $0,27 \pm 0,00$. Anhand der Untersuchungsergebnisse zeigt sich, dass bei 300 °C ein Maximum des Verfestigungsexponenten von $0,35 \pm 0,01$ erreicht wird, was einer Steigerung um mehr als 21 % in Bezug auf Raumtemperatur entspricht. Doch auch bereits bei 200 °C ergibt sich eine Erhöhung des Verfestigungsexponenten um knapp 12 % auf $0,31 \pm 0,02$ im Vergleich zu Raumtemperatur. Das Maximum bei 300 °C lässt sich durch die bereits zuvor genannte temperaturbedingte erhöhte Beweglichkeit der Stickstoffatome erklären. Die diffundierenden Stickstoffatome stellen Hindernisse für die Versetzungsbewegung dar. Prinzipiell ergeben sich bei der Erhöhung der Versetzungsdichte Spannungsfelder, welche durch ein Erschweren oder Verhindern der Bewegung und auch der Entstehung von Versetzungen als Hauptursache für die Verfestigung gelten [69]. Wenn es bei Temperaturen über 300 °C

zum Anheften der Stickstoffatome kommt, ist dementsprechend die Verfestigung geringer ausgeprägt, was sich in der Abnahme des Verfestigungsexponenten zwischen 300 °C und 600 °C widerspiegelt. Aufgrund des stark temperaturabhängigen Verfestigungsverhaltens ist ein hohes Potential für die Nutzbarmachung des Temperatureinflusses beispielsweise für die Steigerung der Niethärte gegeben.

Ausgehend von den dargelegten Erkenntnissen kann für den Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und 300 °C festgehalten werden, dass mit zunehmender Temperatur eine Reduzierung der Fließspannung und Fließgrenze erreicht werden kann, wodurch ein verringerter Kraftbedarf und eine reduzierte Werkzeugbeanspruchung zu erwarten sind. Gleichzeitig besteht in diesem Temperaturbereich das Potential, eine Härte- und Festigkeitssteigerung der Niete zu erzielen. Wird zusätzlich der erhöhte Energiebedarf bedacht, mit welchem eine weitere Temperaturerhöhung auf Temperaturen von über 300 °C verbunden ist, erweist es sich als zielführend, den Fokus bei den weitergehenden Untersuchungen zur Nietherstellung auf den Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und 300 °C zu legen.

Was den neben dem druckaufgestickten Stahl 1.3815 analysierten Edelstahl 1.4541 anbelangt, hat die Umformtemperatur grundsätzlich einen ähnlichen Einfluss auf die Fließspannung, was anhand der in Bild 10 a) gezeigten Fließkurven erkennbar wird. Bereits eine Temperaturerhöhung auf 200 °C führt bei den untersuchten Werkstoffen zu einer Verringerung des Fließspannungsniveaus im Vergleich zu Raumtemperatur.

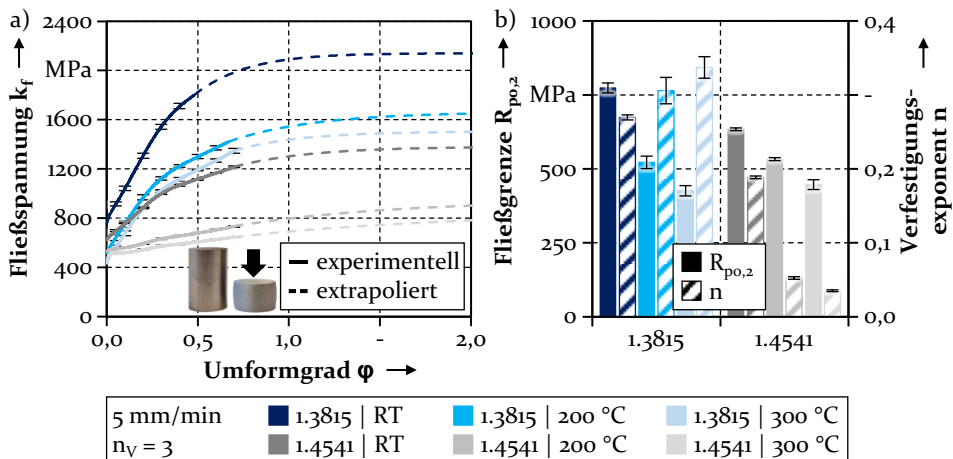


Bild 10: Einfluss der Umformtemperatur auf a) die Fließkurve und b) die Fließgrenze und den Verfestigungsexponenten der potentiellen Nietwerkstoffe

In Bezug auf die Fließgrenze und den Verfestigungsexponenten hingegen variiert der Temperatureinfluss in Abhängigkeit vom Werkstoff, wie aus Bild 10 b) hervorgeht. Für den Edelstahl 1.4541 ergibt sich eine Verringerung der Fließgrenze um etwa 15 % bei 200 °C und 30 % bei 300 °C gegenüber Raumtemperatur. Im Gegensatz zu 1.3815 ist der Temperatureinfluss auf die Fließgrenze demnach geringer ausgeprägt. Einen zentralen Unterschied zwischen diesen beiden Werkstoffen stellt die Abhängigkeit der Verfestigung von der Umformtemperatur dar. Während beim druckaufgestickten Stahl 1.3815 infolge der Temperaturerhöhung eine höhere Verfestigung auftritt, wird der Verfestigungsexponent von 1.4541 um über 70 % bei 200 °C und 80 % bei 300 °C reduziert. Dies verdeutlicht das besondere Potential von 1.3815 für den Einsatz als Nietwerkstoff.

Einfluss der Umformtemperatur auf die Werkstoffeigenschaften bei mehrstufiger Umformung

Da die Nietherstellung durch eine mehrstufige Umformung erfolgt, wird der Temperatureinfluss auf die grundlegenden Werkstoffeigenschaften des druckaufgestickten Stahls 1.3815 anhand von zweistufigen Stauchversuchen zusätzlich zu den konventionellen Stauchversuchen untersucht. Auf diese Weise werden grundsätzliche Erkenntnisse erlangt, inwiefern sich die Kombination unterschiedlicher Temperaturen für die beiden Umformstufen auf die allgemeinen Umformeigenschaften auswirkt. Diese Erkenntnisse bilden nicht nur die Grundlage für ein tieferes Prozessverständnis, sondern dienen auch der Erarbeitung einer prozessangepassten Temperaturführungsstrategie für die Nietherstellung. Die auf Basis der zweistufigen Stauchversuche abgeleiteten Fließkurven für unterschiedliche Kombinationen aus Raumtemperatur und 200 °C sind in Bild 11 dargestellt.

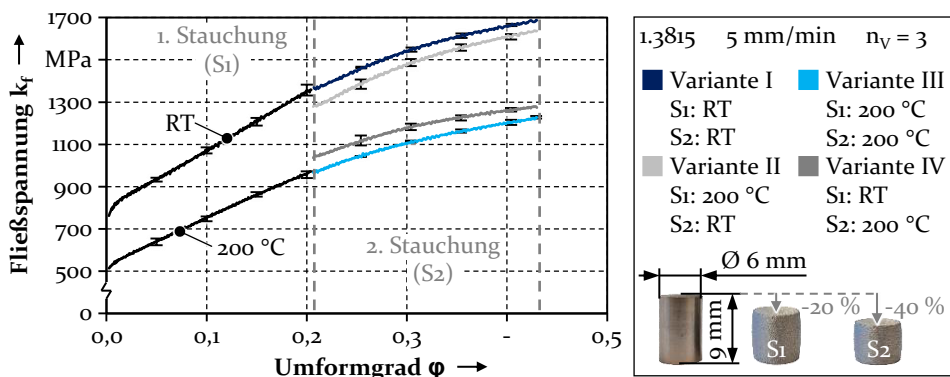


Bild 11: Einfluss unterschiedlicher Temperaturkombinationen auf die Fließkurven von 1.3815 bei zweistufiger Stauchung nach [151]

Für die gewählte Temperaturkombination aus Raumtemperatur in Stufe 1 und 200 °C in Stufe 2, welche als Variante IV bezeichnet wird, ergibt sich eine Reduzierung der Fließspannung bei der zweiten Stauchung im Gegensatz zur Variante I, bei welcher beide Stauchstufen bei Raumtemperatur durchgeführt werden. In diesem Fall ist der Unterschied bezüglich der Temperatur in der zweiten Stufe entscheidend. Im Vergleich zur Variante III, bei welcher für beide Stufen 200 °C genutzt wird, ist die Fließspannung bei der Variante IV allerdings erhöht, obwohl bei beiden Varianten die zweite Stauchung bei 200 °C erfolgt. Ebenso ergeben sich Unterschiede für die beiden Varianten I und II, welche sich ebenfalls nur in Bezug auf die Temperatur in Stufe 1 unterscheiden. Bei der Variante II liegt die Fließspannung in Stufe 2 unterhalb der Fließspannung bei der Variante I. Dementsprechende Unterschiede treten auch bei den Fließgrenzen bei der zweiten Stauchung auf, welche in Tabelle 4 aufgelistet sind.

Tabelle 4: Fließgrenzen von 1.3815 bei der zweiten Stauchung im zweistufigen Stauchversuch für die vier untersuchten Varianten

Variante	R _{po,2} in MPa	Variante	R _{po,2} in MPa
I	1390,6 ± 13,6	III	978,4 ± 7,3
II	1291,4 ± 15,0	IV	1046,4 ± 35,3

Beim Vergleich sowohl der beiden Varianten I und II als auch der Varianten III und IV ergibt sich eine Abweichung der Fließgrenzen von etwa 7 %. Durch die Gegenüberstellung derjenigen Varianten, bei welchen die zweite Stauchung bei der gleichen Temperatur erfolgt und welche dennoch Unterschiede in Bezug auf die Fließgrenze und Fließspannung in Stufe 2 aufweisen, wird ersichtlich, dass die Temperatur in Stufe 1 indirekt einen Einfluss auf die Umformung in Stufe 2 hat. Dieser Einfluss ist für den Nietherstellprozess zu überprüfen, um die Kenntnis des Einflusses für eine prozessangepasste Temperaturführung zu nutzen.

Einfluss der Umformgeschwindigkeit auf die Werkstoffeigenschaften

Um die Umformgeschwindigkeit als potentiellen Einflussfaktor auf die mechanischen Eigenschaften des druckaufgestickten Stahls 1.3815 im Rahmen der Untersuchungen einzubeziehen, werden zusätzlich Stauchversuche bei einer konstanten Prüfgeschwindigkeit von 0,5 mm/min sowie 50 mm/min durchgeführt und auf dieser Basis die Fließkurven in Abhängigkeit von der Umformgeschwindigkeit ermittelt, welche in Bild 12 dargestellt sind. Für die bei Raumtemperatur durchgeführten Stauchversuche bei 50 mm/min wird die Universalprüfmaschine FS-300 der Firma walter+bai mit einer Maximalkraft von 300 kN genutzt.

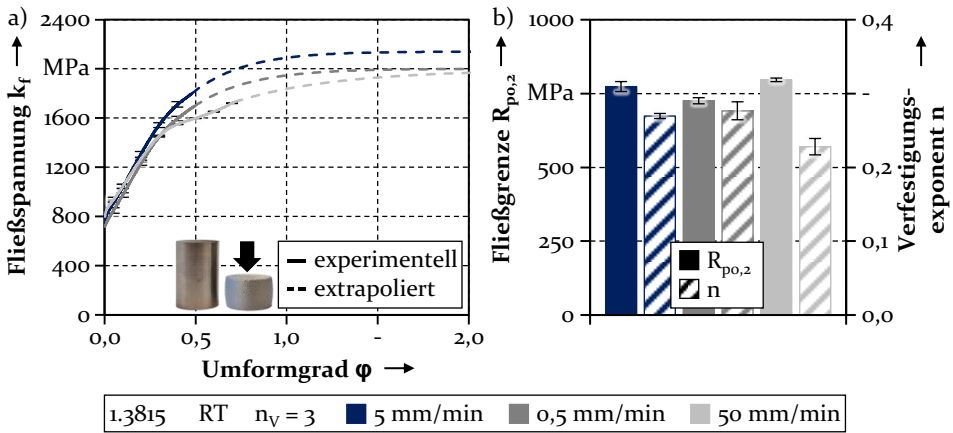


Bild 12: Einfluss der Umformgeschwindigkeit auf a) die Fließkurve und b) die Fließgrenze und den Verfestigungsexponenten von 1.3815

Prinzipiell steigt mit zunehmender Umformgeschwindigkeit die Versetzungsdichte und damit die Verfestigung schneller an [69]. Der Einfluss der Umformgeschwindigkeit ist bei hohen Temperaturen aufgrund der verringerten Zeit für den Ablauf von Entfestigungsvorgängen auf Basis von Erholungs- und Rekristallisationsvorgängen in der Regel stärker ausgeprägt als bei Raumtemperatur, wobei eine Erhöhung der Umformgeschwindigkeit meist mit einer Erhöhung der Fließspannung einhergeht [150]. Für die untersuchten Prüfgeschwindigkeiten bei Raumtemperatur ist das mit zunehmendem Umformgrad erreichbare Fließspannungsniveau bei 5 mm/min am höchsten. Die im Vergleich dazu reduzierte Fließspannung bei 50 mm/min lässt sich durch den zusätzlichen Einfluss der Erwärmung der Probe, welcher bei erhöhten Umformgeschwindigkeiten auftritt, erklären. Da die Zeit für die Wärmeabfuhr an das Werkzeug bei erhöhter Umformgeschwindigkeit geringer ist, bilden sich inhomogene Temperaturfelder in der Probe aus, was zu einer Verringerung der Fließspannung führen kann und weshalb der Einfluss der Umformgeschwindigkeit auch bei Raumtemperatur nicht zu vernachlässigen ist [150]. In Bezug auf die Fließgrenze tritt für die untersuchten Prüfgeschwindigkeiten nur eine geringfügige Abhängigkeit von der Geschwindigkeit auf. Im Gegensatz dazu ergibt sich bei 50 mm/min eine Verringerung des Verfestigungsexponenten um mehr als 15 % verglichen mit 5 mm/min. Es ist nicht auszuschließen, dass dieser Effekt ebenfalls auf eine Erwärmung der Probe sowie auf die verringerte Zeitspanne für den Ablauf von Diffusionsvorgängen des interstitiell gelösten Stickstoffs zurückzuführen ist.

Auf Basis der vorgestellten Ergebnisse kann geschlossen werden, dass eine Erhöhung der Umformgeschwindigkeit zu einer Reduzierung der erforderlichen Umformkraft und damit der auftretenden Spannungen im Werkzeug führt. Gleichzeitig muss aufgrund der verringerten Verfestigung allerdings davon ausgegangen werden, dass eine geringere Festigkeit und Härte der umgeformten Bauteile erzielbar ist. Diese Aussagen können gesichert nur für den untersuchten Bereich der Umformgeschwindigkeit getroffen werden. Im Hinblick auf die realen Bedingungen im industriellen Umfeld mit weitaus höheren Prozessgeschwindigkeiten sind weiterführende Untersuchungen zum Einfluss der Umformgeschwindigkeit notwendig, welche nicht Teil dieser Arbeit sind.

Wechselwirkung zwischen Umformtemperatur und Umformgeschwindigkeit

Um ein umfassendes Verständnis für die Umformeigenschaften des druckaufgestickten Stahls 1.3815 zu erhalten, ist die Kenntnis einer potentiellen Wechselwirkung zwischen Umformtemperatur und Umformgeschwindigkeit erforderlich. Die Wechselwirkung zwischen den beiden Einflussgrößen wird anhand des Vergleichs der Stauchversuche bei 0,5 mm/min und 5 mm/min sowohl bei Raumtemperatur als auch bei 200 °C analysiert. Wie aus den in Bild 13 dargestellten Ergebnissen hervorgeht, sind die prinzipiellen Zusammenhänge bezüglich des Temperatureinflusses auf die Werkstoffeigenschaften bei 5 mm/min auf die Umformung bei 0,5 mm/min übertragbar. Die Temperaturerhöhung führt in beiden Fällen zu einer Reduzierung des Fließspannungsniveaus und der Fließgrenze sowie zu einer Steigerung des Verfestigungsexponenten.

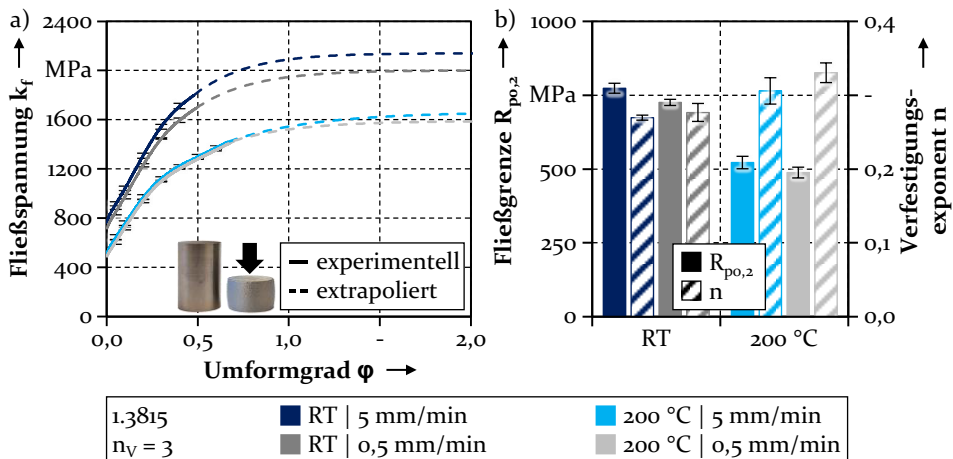


Bild 13: Einfluss der Umformtemperatur und der Umformgeschwindigkeit auf a) die Fließkurve und b) die Fließgrenze und den Verfestigungsexponenten von 1.3815

Dennoch erfolgt die Reduzierung des Fließspannungsniveaus bei Temperaturerhöhung bei 0,5 mm/min in geringerem Maß als bei 5 mm/min. Darüber hinaus führt die Temperaturerhöhung bei 0,5 mm/min zu einer Erhöhung des Verfestigungsexponenten um nahezu 20 %, während der Unterschied bei 5 mm/min bei knapp 12 % liegt. Anhand dessen zeigt sich die Wechselwirkung von Temperatur und Geschwindigkeit. Dadurch dass bei einer geringeren Umformgeschwindigkeit mehr Zeit für die Diffusion von Stickstoffatomen zur Verfügung steht, resultiert aus der Kombination mit der erhöhten Beweglichkeit der Stickstoffatome bei erhöhter Temperatur eine Verstärkung des Temperatureinflusses auf die Verfestigung. Durch die Ergebnisse wird ersichtlich, dass bei der Umformung von 1.3815 eine gegenseitige Beeinflussung der Umformtemperatur und der Umformgeschwindigkeit vorliegt. Für eine potentielle zukünftige Übertragung der im Rahmen dieser Arbeit erlangten Erkenntnisse auf die Anwendung im industriellen Umfeld ist dies zu berücksichtigen.

Einfluss der Umformtemperatur auf die Reibung

Um ein umfassendes Prozessverständnis für die Umformung von Nieten aus dem druckaufgestickten Stahls 1.3815 zu erlangen, ist die Kenntnis der Änderung von Reibungsbedingungen infolge einer Erhöhung der Prozess-temperatur notwendig. Die auf Basis von Ringstauchversuchen ermittelten Reibfaktoren in Abhängigkeit von der Umformtemperatur für 1.3815 und 1.4541 sind nachfolgendem Bild 14 zu entnehmen.

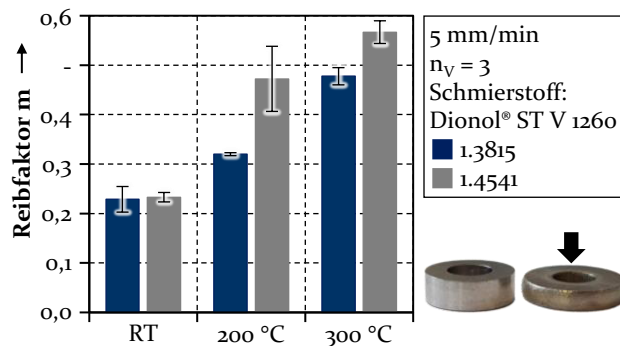


Bild 14: Reibfaktoren bei der Umformung der potentiellen Nietwerkstoffe 1.3815 und 1.4541 in Abhängigkeit von der Umformtemperatur

Im Vergleich zum Reibfaktor von $0,23 \pm 0,03$ bei der Umformung von 1.3815 bei Raumtemperatur ist der Reibfaktor bei 200 °C um knapp 40 % erhöht, bei 300 °C beträgt der Reibfaktor mehr als das Doppelte. Der Zusammenhang von erhöhter Temperatur und erhöhter Reibung tritt auch für den Referenzwerkstoff 1.4541 auf. Eine Ursache für die Zunahme der Reibung

bei einer Temperaturerhöhung kann im Allgemeinen in der Veränderung der Viskosität des Schmierstoffs [134], dem Abreißen des Schmierfilms [135] sowie der Vergrößerung der Reibfläche liegen, wodurch auch die Erhöhung der Reibfaktoren bei erhöhter Temperatur im Rahmen der in dieser Arbeit durchgeführten Versuche begründet sein kann.

Auf Basis der Erkenntnisse zum Temperatureinfluss auf die mechanischen Eigenschaften des druckaufgestickten Stahls 1.3815 ist zunächst von einer Verringerung der erforderlichen Umformkraft und der Werkzeugbeanspruchung bei erhöhter Temperatur im Vergleich zu Raumtemperatur auszugehen. Dem entgegen steht allerdings die Zunahme der Reibung bei Temperaturerhöhung. Diese grundlegenden Zusammenhänge dürfen bei der Prozessauslegung für die Nietherstellung nicht außer Acht gelassen werden und bilden darüber hinaus eine Grundlage für die Identifikation von Ursachen für auftretende Temperatureffekte bei der Nietherstellung.

5.3 Erarbeitung eines numerischen Modells und eines Versuchsaufbaus

Für die Konzeptionierung des Herstellprozesses zur Umformung von Nieten aus hochstickstofflegiertem Stahl werden zunächst grundsätzliche Anforderungen an den Umformprozess und den für die Umsetzung genutzten Versuchsaufbau definiert. Das Konzept wird mithilfe einer numerisch gestützten Auslegung erarbeitet, um die Eignung des Werkzeugs im Hinblick auf die Beanspruchbarkeit vor dem Hintergrund der hohen Werkzeugbeanspruchung, welche mit der Umformung hochverfestigender Werkstoffe einhergeht, zu gewährleisten. Auf das hierfür konzipierte numerische FE-Modell, den Werkzeugaufbau sowie die Validierung des numerischen Modells mithilfe der experimentellen Versuchsdurchführung wird in den nachfolgenden Abschnitten eingegangen.

5.3.1 Definition von Anforderungen an den Umformprozess und den Versuchsaufbau

Im industriellen Umfeld erfolgt die Nietherstellung in mehreren Umformstufen. Um dies abzubilden und den Einfluss einer vorhergehenden Stufe auf die nachfolgende Stufe in die Untersuchungen einzubeziehen, wird für den Nietherstellprozess im Rahmen dieser Arbeit ein zweistufiger Umformprozess gewählt, wie Bild 15 a) zu entnehmen ist. Die Erarbeitung dieses grundlegenden Konzepts basiert auf der numerisch gestützten Auslegung des Prozesses.

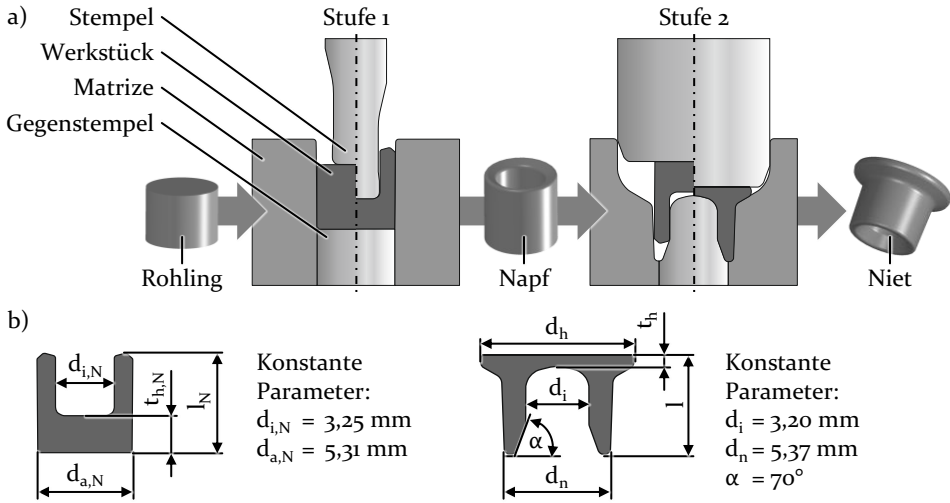


Bild 15: a) Umformstufen beim Nietherstellprozess, b) Napf- und Nietgeometrie unter Angabe konstanter Parameter

In Stufe 1 wird aus einem zylindrischen Rohling mittels Napf-Rückwärts-Fließpressen ein Napf und somit der Nietschaft umgeformt. Bei Stufe 2, in welcher der Napf anschließend weiter umgeformt wird, handelt es sich um eine Kombination aus einem Stauchprozess und einem Kalibrierschritt. Dabei wird nicht nur der Nietkopf, sondern auch der Nietfuß inklusive der Nietschneide ausgeformt. Aufgrund dieses Konzepts ergeben sich für die Nöpfe und Niete geometrische Parameter, welche durch die eingesetzten Aktivteile festgelegt sind und dementsprechend konstant bleiben, wie in Bild 15 b) dargestellt. Bei den Nöpfen ist der Innendurchmesser $d_{i,N}$ durch den Außendurchmesser des Stempels bedingt ebenso wie der Napf-Außendurchmesser $d_{a,N}$ durch den Innendurchmesser der Matrize. Da diese beiden Parameter demzufolge konstant bleiben, kann eine Änderung der Napfhöhe l_N und der Restbodendicke $t_{h,N}$ direkt auf Einflüsse von Prozessparametern wie beispielsweise der Umformtemperatur zurückgeführt werden. Die geometrischen Parameter der Niete basieren auf der zuvor erarbeiteten, neuen Nietgeometrie (vergleiche Bild 6). Der Innendurchmesser d_i und der Schneidwinkel α sind durch die Geometrie des Gegenstempels festgelegt, während sich der Nenndurchmesser d_n durch die Matrizengeometrie ergibt. Aufgrund dessen können Veränderungen des Kopfdurchmessers d_h , der Nennlänge l und der Kopfdicke t_h dem Einfluss von variierten Prozessparametern zugeordnet werden.

Für die Umsetzung der experimentellen Nietherstellung in zwei Stufen wird ein Werkzeugkonzept erarbeitet, welches die nachfolgenden grundlegenden Anforderungen erfüllen soll:

- Modularer Aufbau für den Austausch der Aktivteile zur Umsetzung eines mehrstufigen Umformprozesses;
- Möglichkeit zur Anpassung der Umformtemperatur für die Untersuchung des Temperatureinflusses bis zu maximal 600 °C;
- Zentrale und symmetrische Krafteinleitung zur Vermeidung einer ungleichmäßigen Beanspruchung der Aktivteile und
- Eignung für die Umformung hochverfestigender Werkstoffe im Hinblick auf die hohe Werkzeugbeanspruchung und dementsprechende Auswahl geeigneter Werkstoffe für die Aktivteile.

Die Auslegung des Umformwerkzeugs basiert im Wesentlichen auf der numerischen Analyse der während der Umformung in den Aktivteilen auftretenden Spannungen. Hierfür wird ein mehrstufiges numerisches FE-Modell, dessen Aufbau im folgenden Abschnitt beschrieben wird, genutzt.

5.3.2 Numerisches Modell

Das im Rahmen dieser Arbeit konzipierte numerische FE-Modell zur Abbildung des Nietherstellprozesses erfüllt zwei unterschiedliche Zwecke. Zum einen stellt es eine zentrale Voraussetzung für die numerisch gestützte Auslegung des Umformwerkzeugs inklusive der Auswahl geeigneter Werkstoffe für die Aktivteile dar. Zum anderen erfolgt die Untersuchung des Nietherstellprozesses und der umgeformten Bauteile nicht nur auf Basis experimenteller Untersuchungen, sondern in Kombination mit einer numerischen Analyse. Hierdurch wird das Erreichen eines tiefergehenden Prozessverständnisses in Bezug auf die Einflüsse auf die Werkzeugbeanspruchung, den Stofffluss und die sich ergebenden Bauteileigenschaften ermöglicht. Aufgrund der Rotationssymmetrie der Bauteile wurde ein 2D-axialsymmetrisches FE-Modell zur Abbildung des Nietherstellprozesses aufgebaut. Das Modell stellt eine Weiterentwicklung des in [146] vorgestellten Modells dar. Der prinzipielle Modellaufbau ist in Bild 16 veranschaulicht, wobei die Vernetzung zur besseren Unterscheidung der einzelnen Komponenten in der visuellen Darstellung nicht abgebildet ist. Für die Simulation des mehrstufigen Umformprozesses zur Nietherstellung erfolgt die Berücksichtigung der Bauteilhistorie durch die Übertragung bauteilrelevanter Daten wie beispielsweise der Vorverfestigung von einer Stufe zur nächsten Stufe der Simulation.

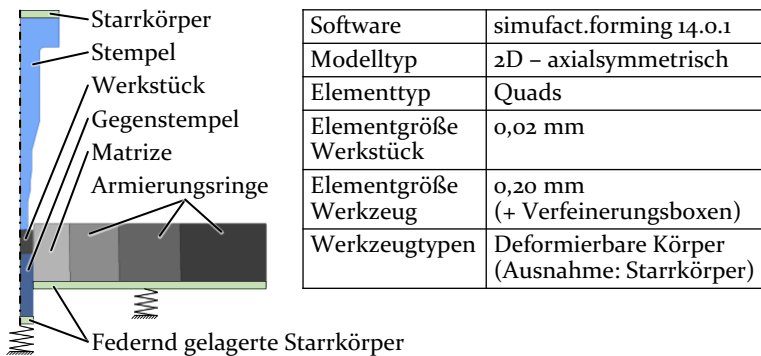


Bild 16: Aufbau des numerischen Modells zur Abbildung des Nietherstellprozesses am Beispiel von Stufe 1

Neben dem Werkstück werden auch die Aktivteile als deformierbare Körper definiert, um die Analyse der in den Aktivteilen auftretenden Spannungen zu ermöglichen. Darüber hinaus wird auf diese Weise die Abbildungsgenauigkeit des Modells verbessert, da die Elastizität der Aktivteile im Umformprozess berücksichtigt wird. Dies hat nicht nur Auswirkungen auf die berechneten Kraft-Weg-Daten, sondern auch auf die resultierende Bauteilgeometrie in der Simulation. Des Weiteren wird die Vorspannung der Matrize durch eine dreifache Armierung mittels virtueller Überschneidung der Armierungsringe abgebildet. Für die Vernetzung der Komponenten wird der Quadtree-Vernetzer zur Erzeugung der 2D-Geometrien aus Vierecken genutzt. Um die Rechenzeit zu beschleunigen und da bei den Aktivteilen keine plastische Deformation auftritt, wird für die Aktivteile eine gegenüber dem Werkstück größere Elementgröße eingesetzt. Allerdings werden in den Kontaktbereichen zwischen Werkstück und Werkzeugkomponenten Verfeinerungsboxen eingesetzt, um in diesen Bereichen vergleichbare Elementgrößen zu erreichen, was für einen stabilen Ablauf der Simulation erforderlich ist. Für die Definition des Werkstückmaterials werden die im Rahmen der Werkstoffcharakterisierung ermittelten Fließkurven in Abhängigkeit von der Prozesstemperatur verwendet, sodass der Temperatureinfluss auf den Prozess und die Bauteileigenschaften auch anhand der Simulation analysiert werden kann. Für die Zuordnung der Werkstoffe zu den Aktivteilen werden die Elastizitätsmoduln entsprechend den Herstellerangaben implementiert. Um bei der numerischen Analyse den Temperatureinfluss auf die Reibung einzubeziehen, werden für die Definition der Kontaktbedingungen die auf Basis der Ringstauchversuche ermittelten, temperaturabhängigen Reibfaktoren eingesetzt. Des Weiteren ist die Berücksichtigung der elastischen Nachgiebigkeit der Presse im Hinblick auf

die erreichbare Genauigkeit der Simulation relevant [142]. Daher wird die Maschinenauffederung im numerischen Modell implementiert, indem die Starrkörper, welche mit dem Gegenstempel und dem Armierungsverbund in Kontakt sind, als federnd gelagerte Werkzeuge definiert werden, welchen die Pressensteifigkeit der genutzten Anlage SchenckTrebel RM400 von 386,1 kN/mm zugewiesen wird.

5.3.3 Numerisch gestützte Auslegung

Für die beanspruchungsgerechte Auslegung der Aktivteile des Umformwerkzeugs wird eine mithilfe des zuvor beschriebenen FE-Modells für beide Umformstufen durchgeführte numerische Spannungsanalyse hinzugezogen. Die konstruktive Auslegung des Napf-Rückwärts-Fließpress-Stempels in Stufe 1 erfolgt darüber hinaus zusätzlich in Anlehnung an die Empfehlungen der ICFG in [152]. Für die Auslegung des Armierungssystems wird außerdem die VDI-Richtlinie 3176 [153] herangezogen. Gemäß der numerischen Spannungsanalyse liegt bei der Umformung von 1.3815 eine hohe Druckbeanspruchung insbesondere des Stempels in Stufe 1 sowie des Stempels, des Gegenstempels und der Matrize in Stufe 2 vor. In Bild 17 sind die ermittelten Maximalwerte der von-Mises-Vergleichsspannung $\sigma_{V,Mises}$ und der Kontaktnormalspannung σ_N zusammengefasst.

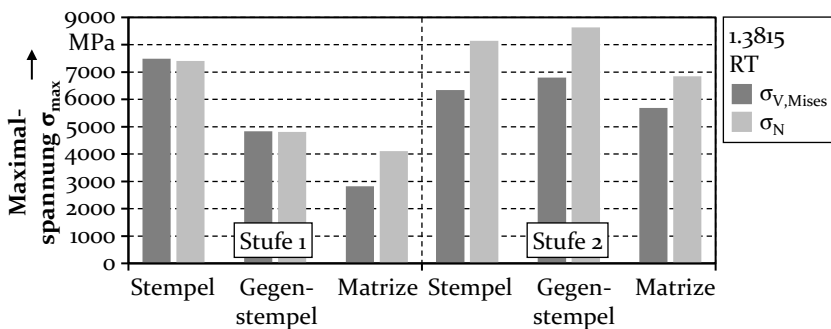


Bild 17: Maximale lokale Spannungswerte in Stempel, Gegenstempel und Matrize in beiden Umformstufen entsprechend der numerischen Spannungsanalyse

In Anbetracht der hohen Spannungswerte ist für die Stempel, Gegenstempel und Matrizen der Einsatz von Hartmetallen mit einer entsprechenden Druckfestigkeit erforderlich. Unter anderem wird die Feinstkornsorte Koi des Herstellers CERATIZIT genutzt, welche eine Druckfestigkeit von 8500 MPa aufweist und damit eine der am Markt verfügbaren Sorten mit der höchsten Druckfestigkeit ist. Durch die beanspruchungsgerechte Aus-

legung der Aktivteile wird somit sichergestellt, dass das Werkzeug hinsichtlich der Beanspruchbarkeit für die Umformung hochverfestigender Werkstoffe prinzipiell geeignet ist. Um bei der Analyse der Einflüsse auf die Werkzeugbeanspruchung den Fokus auf die durch die höchsten lokalen Spannungen gekennzeichneten Bereiche der Aktivteile legen zu können, erfolgt des Weiteren die Identifikation der hochbeanspruchten Bereiche anhand der numerischen Spannungsanalyse, wie in Bild 18 dargestellt.

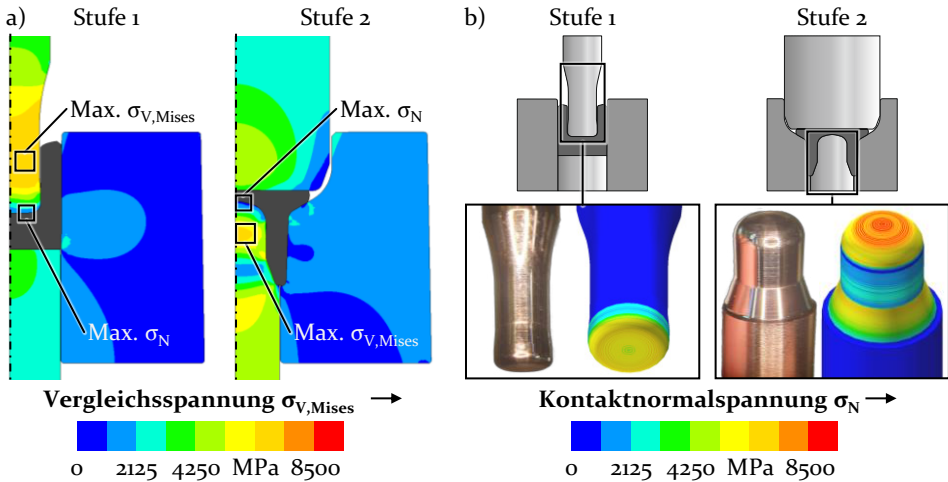


Bild 18: Identifizierte hochbeanspruchte Bereiche in den Aktivteilen bei der Nietherstellung unter Nutzung von 1.3815 bei RT bezüglich a) Vergleichsspannungen, b) Kontaktnormalspannungen

Es ist bekannt, dass beim Napf-Rückwärts-Fließpressen im Allgemeinen die höchste Beanspruchung am Stempel auftritt [121]. In Stufe 1 der zwei-stufigen Nietherstellung werden die höchsten Werte der von-Mises-Vergleichsspannung von über 7000 MPa im Bereich der Querschnittsverjüngung des Stempels lokalisiert, welche dazu dient, dass sich ein freier Spalt zwischen Stempel und Werkstück ergibt, sodass die Reibung reduziert wird und der Werkstoff im inneren Bereich der Napfwand frei fließen kann. Für die Kontaktnormalspannung werden bedingt durch den radialen Stofffluss nach außen die höchsten Werte an der Stirnseite des Stempels in Richtung des äußeren Radius erreicht. Hierbei treten lokal Werte bis zu knapp 7400 MPa auf. In Stufe 2 werden die höchsten Spannungswerte im Bereich der Spitze des Gegenstempels ermittelt. Darüber hinaus treten Spannungsspitzen im Übergangsbereich zwischen der Spitze und der Schräge zur Ausformung der Nietschneide auf. Aufgrund dessen ist ersichtlich, dass eine Vergrößerung des Schneidwinkels, wie bereits bei der Einführung der Idealgeometrie der Niete beschrieben, zu einer Reduktion der von-Mises-

Vergleichsspannung an dieser Stelle führt, da der Stofffluss in den unteren Bereich der Matrize auf diese Weise begünstigt wird. Die höchsten erreichten Werte der Kontaktnormalspannung liegen an der Spitze des Gegenstempels vor. Mit fortschreitender Ausformung des Nietkopfs können lokal Werte von über 8600 MPa erreicht werden, welche als kritisch einzuordnen sind, da in diesem Fall die Druckfestigkeit des als Werkzeugwerkstoff genutzten Hartmetalls Ko1 von 8500 MPa überschritten wird. Entsprechend der Identifikation der höchstbeanspruchten Bereiche wird der Fokus bei der Untersuchung der Einflussgrößen auf die Werkzeugbeanspruchung demzufolge für die Analyse von Stufe 1 auf den Stempel und für die Analyse von Stufe 2 auf den Gegenstempel gelegt.

5.3.4 Werkzeugaufbau und Versuchsdurchführung

Der aus den grundlegenden Anforderungen abgeleitete Werkzeugaufbau ist in Bild 19 a) dargestellt. Entsprechend der Anforderung an die Modularität des Werkzeugs können die Aktivteile je nach Umformstufe ausgetauscht werden. Zu den Aktivteilen zählen Stempel, Gegenstempel, Matrize und Armierungsringe. Um die Versuchsdurchführung bei unterschiedlichen Umformtemperaturen realisieren zu können, wird ein Bandheizelement um den Zentrierring gelegt, in welchen der Armierungsverbund und die darunterliegende Auflageplatte eingesetzt werden. Ober- und unterhalb des Zentrierrings werden Isolierscheiben integriert. In der Auflageplatte für den Armierungsverbund ist eine Aussparung für ein Thermoelement eingebracht, wodurch das Messen der Temperatur direkt unterhalb des Armierungsverbunds ermöglicht wird, was eine Voraussetzung für das Regeln der Temperatur mittels externem Temperatur-Steuergerät ist. Für die Versuchsdurchführung wird das Werkzeug in die Universalprüfmaschine SchenckTrebel RM400 eingebaut. Um die zentrale und symmetrische Krafteinleitung sicherzustellen, erfolgt die Ausrichtung von Ober- und Unterwerkzeug beim Einbau mithilfe von Passstiften, sodass die korrekte Positionierung von Stempel und Armierungsverbund zueinander gewährleistet ist. Das Auswerfen der Bauteile am Ende des Umformprozesses erfolgt durch die Bewegung des Auswerferstifts mithilfe eines an die Presse angeschlossenen Hydraulikaggregats. Für ein erleichtertes Auswerfen der Näpfe nach der Umformung in Stufe 1 ist die Matrize im Inneren mit einer Schräge von $0,5^\circ$ versehen.

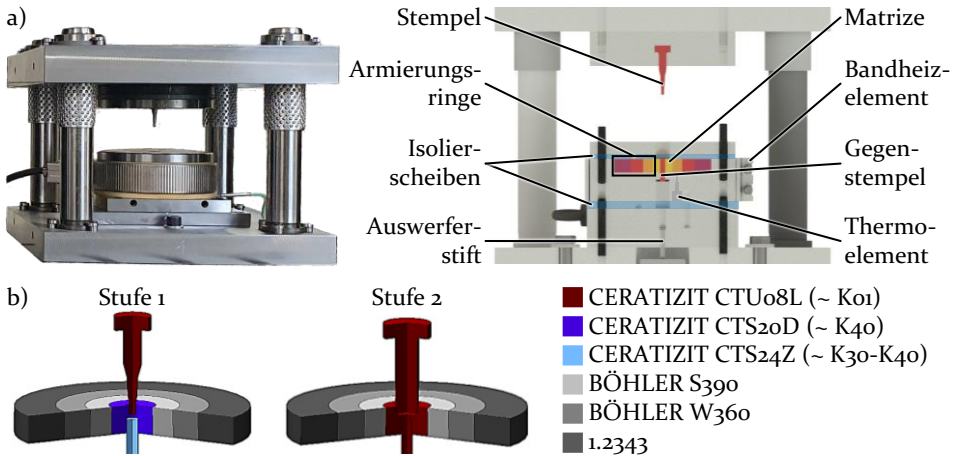


Bild 19: a) Werkzeugaufbau für die Nietherstellung am Beispiel von Stufe 1, b) Werkstoffauswahl für die Aktivelemente in Stufe 1 und Stufe 2

Aus der numerischen Spannungsanalyse der Aktiveile geht hervor, dass die hohen Spannungen, welche beim Umformen des druckaufgestickten Stahls 1.3815 auftreten, die Verwendung von Hartmetallen für Stempel, Gegenstempel und Matrizen in beiden Umformstufen erfordern. Auf dieser Basis wird die Auswahl der in Bild 19 b) dargestellten Werkstoffe für die Aktiveile getroffen. Für den Einsatz von Hartmetall als Matrizenwerkstoff ist eine geeignete Armierungsstrategie essentiell, um auftretende Zugspannungen zu reduzieren und somit einen Matrizenausfall infolge zu hoher Zugbeanspruchung zu vermeiden [122]. Dementsprechend werden für das Vorspannen der Matrizen zur Nietherstellung drei Armierungsringe mit einer Vorspannung von 3 %, 5 % und 3 % eingesetzt.

Für die experimentellen Versuche zur Nietherstellung werden zylindrische Rohlinge mit einem Durchmesser von 5,20 mm und einer Höhe von 4,72 mm eingesetzt, womit das Rohlingvolumen dem Volumen eines Niets mit der zuvor beschriebenen Idealgeometrie entspricht. Die Versuche werden bei einer konstanten Geschwindigkeit von 10 mm/min durchgeführt. Als Schmierstoff wird das Hochleistungsfließpressöl Dionol® ST V 1260 der Firma MKU-Chemie eingesetzt. Bei der Versuchsdurchführung wird der Rohling in der Matrize positioniert und erst nach einer definierten Haltezeit umgeformt, um die vollständige Erwärmung des Rohlings vor der Umformung zu gewährleisten. Dies spielt eine wichtige Rolle für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse bei unterschiedlichen Temperaturen und für die Überprüfung der Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus den Untersuchungen zur Werkstoffcharakterisierung auf

den Nietherstellprozess. Für 200 °C wird eine Haltezeit von 2 Minuten und für 300 °C eine Haltezeit von 3 Minuten festgelegt. Die Bestimmung der Haltezeit basiert auf der Überprüfung der Temperatur an der oberen Stirnfläche der Rohlinge mithilfe eines Temperaturmessgeräts. Im Hinblick auf die vollständige Erwärmung bis ins Probeninnere ist bei der Definition der Haltezeit ein Sicherheitsfaktor von 2 eingerechnet. Für die anschließende Versuchsauswertung werden die Kraft-Weg-Daten der Umformversuche analysiert, wobei die während des Versuchs aufgezeichneten Maschinendaten verwendet werden.

5.3.5 Experimentelle Validierung des numerischen Modells

Um eine ausreichende Abbildungsgenauigkeit des numerischen Modells für die weitergehenden Untersuchungen sicherzustellen, erfolgt die Validierung des Modells anhand der Gegenüberstellung mit experimentellen Untersuchungen zur Nietherstellung. Der Vergleich der experimentell und simulativ ermittelten Kraft-Weg-Daten wird in [138] als Ansatz für die Validierung numerischer Modelle empfohlen. Eine Übersicht der Kraft-Weg-Verläufe für die beiden Stufen der Nietherstellung unter Nutzung von 1.3815 bei Raumtemperatur ist in Bild 20 gegeben.

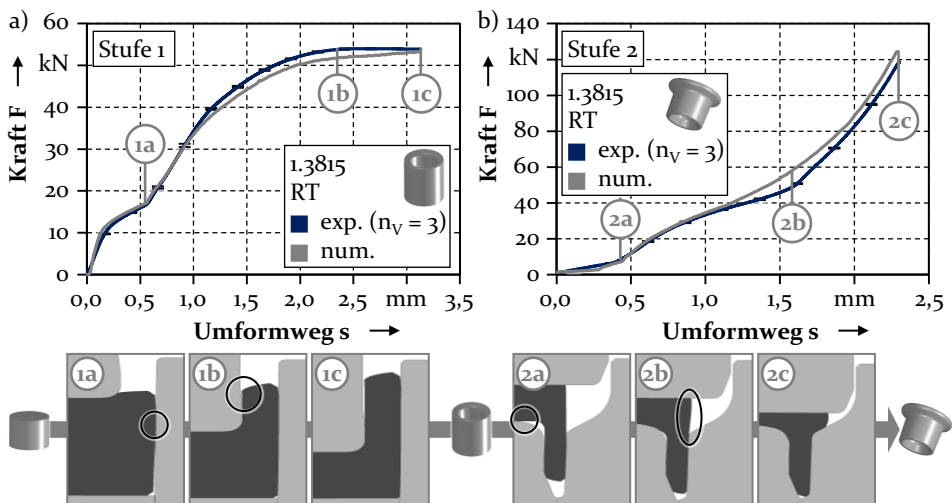


Bild 20: Vergleich der experimentell und numerisch ermittelten Kraft-Weg-Verläufe und Maximalkräfte bei der Nietherstellung in a) Stufe 1, b) Stufe 2

Die Abweichung der Maximalkräfte in Experiment und Simulation liegen für beide Umformstufen unter 5 %. In Stufe 1 beträgt der prozentuale Unterschied 1,4 %, in Stufe 2 ist eine Abweichung um 4,7 % festzustellen. Darüber hinaus sind die in Abhängigkeit vom Prozessablauf charakteristischen

Kraftanstiege entsprechend der experimentell ermittelten Kraft-Weg-Daten auch bei den simulativ ermittelten Kraftverläufen identifizierbar. Indem diese Charakteristika mithilfe der Simulation einzelnen Prozessabschnitten beim Ablauf des Umformvorgangs zuordenbar sind, wie der in Bild 20 unten abgebildeten Darstellung zu entnehmen ist, wird zudem ein vertieftes Prozessverständnis erlangt. Da der Rohling beim Napf-Rückwärts-Fließpressen üblicherweise mit Spiel in die Matrize eingesetzt wird [70] und der Rohling zu Beginn der Umformung zunächst axial und danach radial gestaucht wird [119], beruht in Stufe 1 der ausgeprägte Kraftanstieg nach der elastischen Verformung und dem Beginn der plastischen Verformung darauf, dass das zylindrische Werkstück mit der Innenseite der Matrize in Kontakt kommt (1a). Dies führt zu einer Begrenzung des Werkstoffflusses nach außen, sodass der Werkstoff beginnt, entgegen der Stempelbewegung durch den Ringspalt zwischen Stempel und Matrize zu fließen [70], was in einer Erhöhung der Reibung und in dem beschriebenen Kraftanstieg resultiert. Im Anschluss daran steigt die Kraft mit zunehmendem Umformweg weiter an, während die Napfwand und damit der Nieten ausformt wird. Im weiteren Verlauf des Prozesses fließt der Werkstoff entlang des Fließbunds des Stempels bis zum Erreichen des Spalts zwischen Stempel und Werkstück im Bereich der Querschnittsverjüngung des Stempels (1b). Aufgrund der sich hierdurch ergebenden Verringerung der Reibung wird auch die Kraftzunahme geringer. Infolgedessen stellt sich ein nahezu gleichbleibendes Kraftniveau bis zum Prozessende (1c) ein. Die Kraftzunahme zu Beginn von Stufe 2 steht in Zusammenhang mit dem Beginn der Ausformung der Nieten-schneide. Der Werkstofffluss in Stempelrichtung ist ab diesem Zeitpunkt aufgrund der Schräge am Gegenstempel, durch welche der Schneidwinkel des Nieten bestimmt wird, begrenzt. Das Aufsetzen des Napfbodens auf der Spitze des Gegenstempels (2a) bedingt den ersten charakteristischen Kraftanstieg während des Prozessablaufs. Der Beginn der Ausformung des Nietenkopfs (2b) hat den zweiten klar identifizierbaren Kraftanstieg zur Folge. In diesem Zusammenhang resultiert aus dem radialen Stofffluss nach außen und der sich somit ergebenden Relativbewegung zwischen der Stirnfläche des Stempels und dem Werkstück eine Erhöhung der Reibung. Zusätzlich steigt der Grad der Formfüllung in der Matrize im Bereich des Nietenfußes, was mit einer verstärkten Einschränkung des Stoffflusses in Stempelrichtung verbunden ist. Bis zum Prozessende (2c) ist demzufolge ein zunehmender Kraftanstieg zu verzeichnen.

Für eine umfassende Validierung des numerischen Modells wird neben dem Vergleich der Kraft-Weg-Daten auch der Vergleich der erzielten Bauteilgeometrie nach der Umformung entsprechend Bild 21 a) herangezogen.

Ferner erfolgt eine Gegenüberstellung der erzielten Härteverteilung im Experiment und der Umformgradverteilung in der Simulation, wie in Bild 21 b) dargestellt. Dies erlaubt zwar im Gegensatz zum Vergleich der Kraft-Weg-Daten und der geometrischen Parameter keine quantitative Einordnung der Abweichungen zwischen Experiment und Simulation, ermöglicht aber eine zusätzliche Einschätzung der Abbildungsgenauigkeit des numerischen Modells auf Basis einer qualitativen Bewertung. Denn es besteht eine Korrelation zwischen der Höhe der lokalen Härtewerte und der Höhe der lokalen Umformgrade, wie es in [134] beschrieben ist.

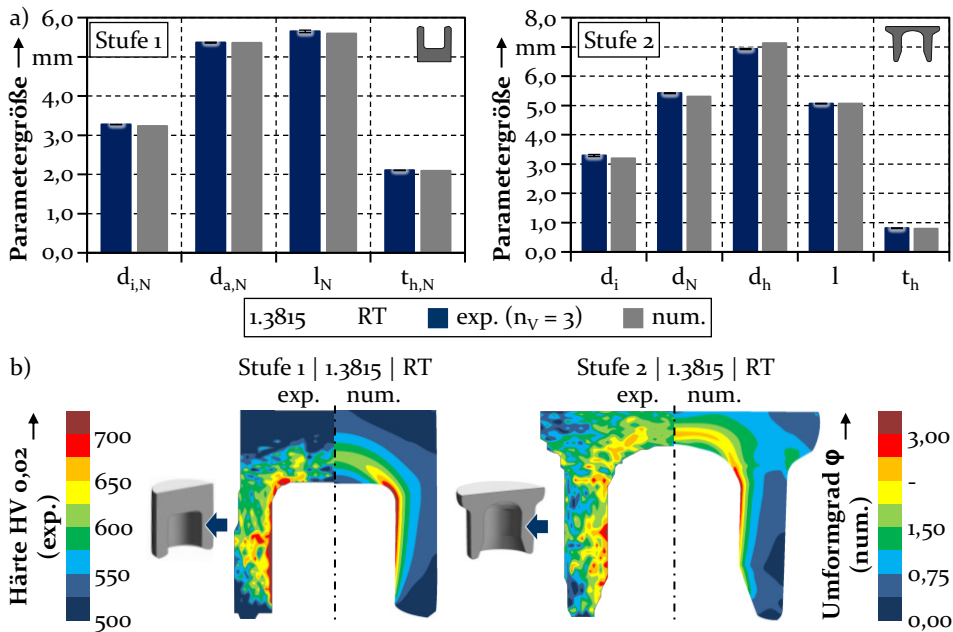


Bild 21: Gegenüberstellung experimentell und numerisch ermittelter a) geometrischer Parameter und b) Härte- und Umformgradverteilung von Näpfen nach Stufe 1 und Nieten nach Stufe 2

Bei den untersuchten geometrischen Parametern bezieht sich die größte Abweichung zwischen experimentell und numerisch ermitteltem Wert nach der Umformung in Stufe 1 auf den Innendurchmesser $d_{i,N}$ der Näpfe und beträgt 1,1 %. Die größte Abweichung nach Stufe 2 in Höhe von 2,9 % ergibt sich für den Innendurchmesser d_i der Nieten. Die genannten prozentualen Abweichungen entsprechen für beide Stufen einem Wert von weniger als 0,1 mm und werden als gering eingestuft. Zuletzt geht aus dem Vergleich der Härte- und der Umformgradverteilung hervor, dass Bereiche mit höheren lokalen Härtewerten anhand höherer lokaler Umformgrade in der

Simulation abgebildet werden. Auf Basis der als gering eingeordneten Abweichungen zwischen den experimentell und simulativ ermittelten Ergebnissen wird davon ausgegangen, dass das numerische Modell eine ausreichende Genauigkeit in Bezug auf die Abbildung des zweistufigen Nietherstellprozesses aufweist. Dies wird durch den qualitativen Vergleich der Härte- und der Umformgradverteilung untermauert. Das numerische Modell wird folglich als validiert angesehen.

5.4 Zusammenfassende Bewertung

Eine wichtige Voraussetzung für die weiteren Untersuchungen ist die Definition grundlegender Anforderungen an die Niete im Rahmen dieses Kapitels, welche in Bezug auf das Fügen von hochfestem Stahl auf der Matrizensseite abgeleitet werden. Das Anforderungsprofil betrifft neben der Nietgeometrie die mechanischen Eigenschaften der Niete. Durch das Erreichen einer Gesamthärte > 480 HV sowie eine entsprechend den Anforderungen im Fügeprozess angepasste Gradierung der mechanischen Nieteigenschaften soll die Fügbarkeit verschiedener Materialkombinationen aus EN AW-5083 und HCT780X mittels Nieten aus 1.3815 sichergestellt werden. Einen weiteren wesentlichen Bestandteil dieses Kapitels bildet die Werkstoffcharakterisierung, anhand derer sich die Umformtemperatur als relevante Einflussgröße auf die mechanischen Eigenschaften der potentiellen Nietwerkstoffe identifizieren lässt. Im Hinblick auf eine mögliche Reduzierung der erforderlichen Umformkräfte und der Werkzeugbeanspruchung sowie eine Festigkeits- und Härtesteigerung der Niete aus 1.3815 wird die Untersuchung des Temperaturbereichs von Raumtemperatur bis 300 °C für die Nietherstellung als zielführend angesehen. Für diesen Temperaturbereich lassen sich auf Basis der Charakterisierungsergebnisse die in Tabelle 5 dargestellten grundlegenden Zusammenhänge für den druckaufgestickten Stahl 1.3815 und den Referenzwerkstoff 1.4541 ableiten.

Tabelle 5: Temperatureinfluss auf die Werkstoffeigenschaften und die Reibungsbedingungen beim Umformen für den Temperaturbereich RT bis 300 °C

Werkstoff	Einfluss einer Temperaturerhöhung auf:			
	k_f	$R_{p0,2}$	n	m
1.3815	↓	↓	↑	↑
1.4541	↓	↓	↓	↑
↑ Steigerung ↓ Reduzierung ■ Positiv ■ Negativ				

Zusätzlich ist festzuhalten, dass die Werkstoffeigenschaften von 1.3815 bei mehrstufiger Umformung durch die Wahl unterschiedlicher Temperaturkombinationen beeinflusst werden. Demzufolge besteht das Potential für die Beeinflussung der Nieteigenschaften durch eine prozessangepasste Temperaturführung, was anhand der experimentellen Herstellung von Nieten in zwei Stufen überprüft werden muss.

Aufgrund der hohen Werkzeugbeanspruchung, welche eine große Herausforderung bei der Umformung hochverfestigender Werkstoffe darstellt, spielt die in diesem Kapitel adressierte Erarbeitung eines geeigneten Werkzeugkonzepts eine zentrale Rolle für die Realisierung des Herstellprozesses von Nieten aus 1.3815. Das für die Auslegung des Umformwerkzeugs konzipierte numerische Modell zur Abbildung des Nietherstellprozesses wird im Rahmen der nachfolgend dargestellten Untersuchungen für die Erreichung eines tiefergehenden Prozessverständnisses genutzt. Eine relevante Erkenntnis betrifft die Identifikation der höchstbeanspruchten Bereiche der Aktivteile des Umformwerkzeugs. Die maximalen Spannungen treten in Stufe 1 im Stempel und in Stufe 2 im Gegenstempel auf. Dementsprechend gilt diesen beiden Komponenten das Hauptaugenmerk bei der Analyse der Einflussgrößen auf die Werkzeugbeanspruchung.

6 Analyse der Einflüsse auf den Umformprozess und die Bauteileigenschaften

Der Kern dieses Kapitels ist die grundlegende Analyse von Einflussgrößen auf den Nietherstellprozess und die resultierenden Bauteileigenschaften. Hierfür werden potentielle Einflussgrößen identifiziert und die Auswirkungen der Variation der einzelnen Einflussgrößen eruiert, um die Effekte voneinander separieren zu können. Durch das Aufzeigen von Zusammenhängen zwischen den Einflussfaktoren wird ein grundlegendes Prozessverständnis für den Nietherstellprozess geschaffen. Die Kenntnis dieser Zusammenhänge ist eine notwendige Grundlage für die Beeinflussung des Umformprozesses und der Nieteigenschaften.

6.1 Identifikation von Einflussgrößen

Zu Beginn werden die Ergebnisgrößen bezüglich des Umformprozesses und der Nieteigenschaften definiert. Anhand der Untersuchung der Einflüsse auf diese Ergebnisgrößen sollen Kausalzusammenhänge identifiziert werden, welche für die Prozessführung nutzbar sind. Zu den Ergebnisgrößen der Nietherstellung zählen die Prozesskräfte und die sich auch daraus ergebende Werkzeugbeanspruchung. Diese Größen sind auch von wirtschaftlichem Interesse, da beispielsweise der kumulierte Kraftbedarf für die Wahl der Presse relevant ist und die Werkzeugbeanspruchung Einfluss auf die Werkzeuglebensdauer hat. Auf Basis der Analyse des Werkstoffflusses und der Verfestigung bei der Umformung wird ein tiefergehendes Prozessverständnis generiert. Bezüglich der Nieteigenschaften sind im Hinblick auf das Fügen die nach der Umformung erreichte Nietgeometrie, -härte und -festigkeit entscheidend. In Tabelle 6 sind die untersuchten Ergebnisgrößen zusammengefasst.

Tabelle 6: Untersuchte Ergebnisgrößen und zugehörige Untersuchungsmethoden

Ergebnisgröße	Methode	Ergebnisgröße	Methode
Werkstofffluss und Verfestigung	Numerische Analyse	Nietgeometrie	Optische 3D Messung
Prozesskraft	Experimentelle Analyse	Niethärte	Härtemessung
Werkzeugbeanspruchung	Numerische Analyse	Nietfestigkeit	Numerische Analyse

Die Voraussetzung dafür, Möglichkeiten zur Beeinflussung des Nietherstellprozesses und der Nieteigenschaften aufzuzeigen, ist die vorhergehende Identifizierung potentieller Einflussgrößen, welche für die gezielte Beeinflussung genutzt werden können, sowie die darauffolgende Untersuchung der Auswirkungen einer Variation dieser Einflussgrößen. Eine Übersicht möglicher Einflussfaktoren und relevanter Ergebnisgrößen in Bezug auf die Nietherstellung sowie die Nieteigenschaften wurde mittels der Ishikawa-Methode [154] erarbeitet und ist in Bild 22 visualisiert.

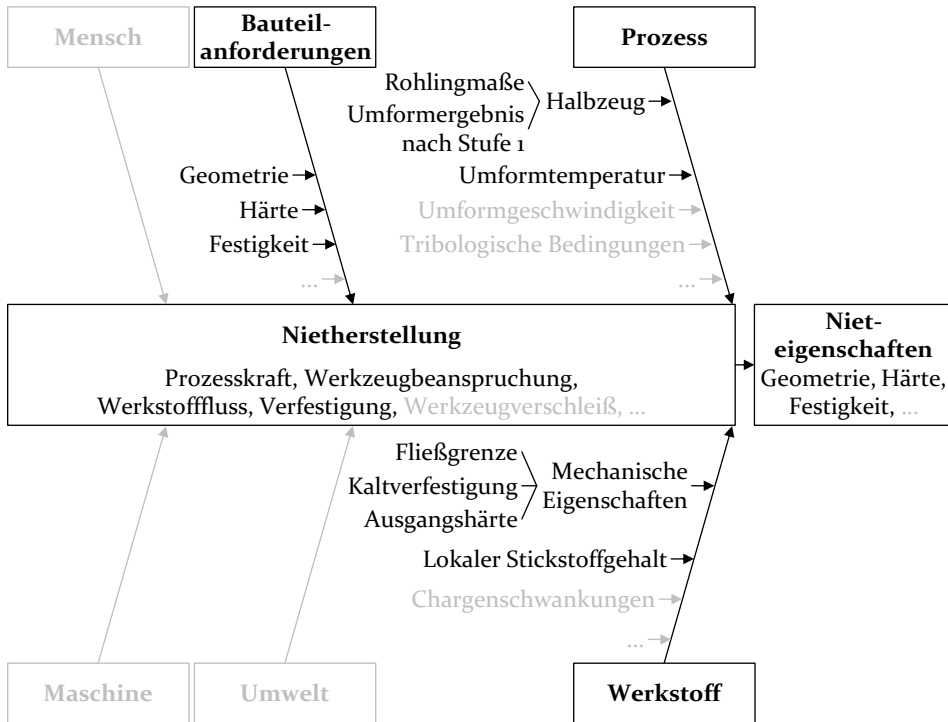


Bild 22: Einflussgrößen auf die Nietherstellung und die Nieteigenschaften (Gau: Nicht Teil der Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit; Schwarz: Teil dieser Arbeit)

Neben den klassischen Haupteinflussgrößen Mensch, Maschine, Umwelt und Werkstoff sind spezifisch für die Nietherstellung der Umformprozess selbst mit einer Vielzahl an Prozessparametern sowie die vorausgesetzten Bauteilanforderungen zu ergänzen. Der Einfluss von Mensch, Maschine und Umwelt wird vor dem Hintergrund der im industriellen Umfeld bestehenden Nietherstellprozesse als vernachlässigbar angenommen, da es sich um automatisierte Prozessabläufe handelt. Hierbei kommt den Bedienern, welchen meist die Prozessüberwachung und regelmäßige Bauteilkontrolle vorbehalten ist, eine überwiegend passive Rolle zu. Von unterschiedlichen

Unternehmen werden zwar verschiedene Anlagen eingesetzt, aber es ist davon auszugehen, dass innerhalb eines Unternehmens vornehmlich baugleiche Anlagen in derselben Produktionslinie zum Einsatz kommen und Anlagenwechsel nur beschränkt stattfinden. Auch der Einfluss der Umwelt wird vor dem Hintergrund der relativ konstanten Bedingungen in den Produktionshallen als geringfügig eingeschätzt. Für die Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit werden daher Einflussgrößen in Bezug auf Werkstoff, Prozess und Bauteilanforderungen priorisiert, während die Analyse der in Bild 22 grau dargestellten Einflussgrößen nicht Teil dieser Arbeit ist. Für die Zuordnung von Effekten zu Einflussgrößen und das Erreichen eines umfassenden Verständnisses hinsichtlich der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge ist es dennoch wichtig, möglichst viele Einflussgrößen zu kennen und sich deren potentiellen Einflusses auf die Ergebnisgrößen bewusst zu sein. Dementsprechend können auch Maßnahmen getroffen werden, welche dazu beitragen, den Einfluss dieser ausgeklammerten Faktoren möglichst zu eliminieren oder gering zu halten. Im Rahmen dieser Arbeit beispielsweise wurde die experimentelle Nietherstellung vollständig unter Nutzung derselben Maschine durchgeführt, für jeden untersuchten Werkstoff durchgängig dieselbe Charge verwendet und die Umformgeschwindigkeit konstant gewählt.

Die Anforderungen an die Niete, welche sich maßgeblich aus den Anforderungen an die Nietgeometrie und die mechanischen Eigenschaften im Fügeprozess ableiten, wurden bereits in Kapitel 5 aufgezeigt und dienen nicht nur als Rahmenbedingungen, sondern sind auch als Vergleichsmaßstab für die Bewertung der in Abhängigkeit von den anderen Einflussgrößen resultierenden Nieteigenschaften heranzuziehen. Der Fokus in dieser Arbeit liegt neben den Bauteilanforderungen vor allem auf den beiden Haupteinflussgrößen Prozess und Werkstoff. Bezüglich prozessseitiger Einflussgrößen ist hinreichend bekannt, dass die gewählte Umformtemperatur einen großen Einfluss auf den Umformprozess hat [69]. Im Hinblick auf den vorgestellten zweistufigen Nietherstellprozess wird im Rahmen dieser Arbeit nicht nur die für beide Umformstufen verwendete Prozesstemperatur variiert, sondern es wird zusätzlich der Einfluss von Temperaturkombinationen mit unterschiedlichen Temperaturen in Stufe 1 und Stufe 2 untersucht. Da es sich um einen zweistufigen Prozess handelt, ist darüber hinaus innerhalb des Prozesses ein Einfluss des Umformergebnisses nach Stufe 1 auf die Umformung in Stufe 2 zu erwarten, wobei dennoch zu klären ist, ob sich die Auswirkungen lediglich auf den zweiten Umformschritt beschränken oder aufgrund der unterschiedlichen Vorverfestigung bis zu den resultierenden Nieteigenschaften reichen. Da in Stufe 1 in diesem Fall ein Napf-

Rückwärts-Fließpressen erfolgt, soll die erreichte Restbodendicke der Näpfe im Vordergrund der Analyse stehen. Bei der industriellen Nietherstellung wird meist gezogener Draht als Halbzeug verwendet. Der Toleranzbereich für den Drahtdurchmesser ist in der Norm DIN EN 10218-2 [155] definiert und spielt eine wichtige Rolle hinsichtlich der Prozessstabilität und der gleichbleibenden Bauteilqualität. Engel et al. [117] zeigten auf, dass im Speziellen das Rohlingvolumen und die Verwendung hochfester Werkstückwerkstoffe die Werkzeugbeanspruchung beeinflussen und kritische Kombinationen der beiden Einflussfaktoren zu einem vorzeitigen Werkzeugversagen führen können. Die Maßschwankungen und damit Volumenschwankungen der Rohlinge stellen dementsprechend gerade im Zusammenhang mit der Verwendung hochverfestigender Nietwerkstoffe bei dem im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Nietherstellprozess eine weitere relevante prozessseitige Einflussgröße dar. Aus diesem Grund werden Untersuchungen zur Variation des Durchmessers und der Höhe der verwendeten zylindrischen Rohlinge durchgeführt. Die tribologischen Bedingungen während der Umformung der Nieten finden insofern indirekt Berücksichtigung, dass im Rahmen der Werkstoffcharakterisierung temperaturabhängige Reibfaktoren ermittelt wurden und darauf basierend der Temperatureinfluss auf die Reibung bei der Identifikation von Ursachen für auftretende Effekte als Erklärungsansatz herangezogen wird. Eine Untersuchung beispielsweise verschiedener Schmierstoffsysteme ist hingegen nicht Teil dieser Arbeit, da für die experimentelle Nietherstellung mit dem Schmierstoff Dionol® ST V 1260 der Firma MKU-Chemie gezielt ein speziell geeigneter Schmierstoff ausgewählt wurde, welcher besonders für Umformprozesse anwendbar ist, die durch hohe Kontaktdrücke gekennzeichnet sind, und welcher darüber hinaus auch bei erhöhten Umformtemperaturen eingesetzt werden kann.

Die Analyse werkstoffseitiger Einflussgrößen erfolgt anhand der Gegenüberstellung der Nietherstellung und der Nieteigenschaften für die beiden potentiellen Nietwerkstoffe 1.3815 und 1.4541. Im Zuge dessen werden Unterschiede beispielsweise in Bezug auf die Prozesskräfte während der Umformung und die erreichte Niethärte auf die mechanischen Werkstoffeigenschaften, welche die Fließgrenze, die Kaltverfestigung und die Ausgangshärte umfassen und für beide Werkstoffe unterschiedlich sind, zurückgeführt. Da die temperaturinduzierte Stickstoffdiffusion in der Literatur als Erklärungsansatz für das temperaturabhängige Umformverhalten hochstickstofflegierter Stähle herangezogen wird [100], wird auch die Analyse des lokalen Stickstoffgehalts des druckaufgestickten Stahls 1.3815 in die

Untersuchungen integriert, um tiefergehende Erkenntnisse über die Vorgänge im Werkstoff zu erhalten und diese mit den resultierenden Bauteileigenschaften in Zusammenhang setzen zu können. Auf diese Weise sollen Zusammenhänge zwischen prozess- und werkstoffseitigen Einflussgrößen detektiert werden, um dieses Wissen für die Beeinflussung des Nietherstellprozesses und der Nieteigenschaften nutzen zu können.

6.2 Grundlegende Untersuchungen zum Temperatureinfluss

Im Folgenden wird zum einen die obere Prozessgrenze für den als zielführend erachteten Temperaturbereich für die Nietherstellung ermittelt, wodurch eine Eingrenzung auf einen geeigneten Temperaturbereich vorgenommen wird. Zum anderen wird der Temperatureinfluss auf den Umformprozess grundlegend analysiert, indem Ursachen für temperaturbedingte Effekte eruiert werden. Hierdurch soll ein Verständnis für die Vielzahl und das Zusammenspiel der zugrundeliegenden Ursachen geschaffen werden. Dies ist notwendig, um die im Rahmen der nachfolgenden Analyse der prozessseitigen Einflussgrößen untersuchten Varianten und dargelegten Temperatureffekte einordnen zu können.

Identifikation eines geeigneten Temperaturbereichs

Aus den Ergebnissen der Werkstoffcharakterisierung des druckaufgestickten Stahls 1.3815 kann ein für die Nietherstellung als zielführend erachteter Temperaturbereich zwischen Raumtemperatur und 300 °C abgeleitet werden. Die obere Grenztemperatur von 300 °C ergibt sich daraus, dass bei dieser Temperatur ein Maximum des Verfestigungsexponenten und zugleich ein lokales Minimum der Fließgrenze erreicht wird. Die Fließgrenze ist in diesem Fall um mehr als 40 % geringer und der Verfestigungsexponent um mehr als 21 % höher als bei der Umformung bei Raumtemperatur. Demnach erscheint eine Umformung der Niete bei 300 °C zunächst vielversprechend, da die Ergebnisse darauf hinweisen, dass infolge der Temperaturerhöhung eine Kraftreduzierung aufgrund der verbesserten Umformbarkeit und gleichzeitig höhere Bauteilfestigkeiten aufgrund der gesteigerten Verfestigung erzielbar sind. Aus experimentellen Untersuchungen zur Nietherstellung bei 300 °C geht allerdings hervor, dass die Festlegung der oberen Temperaturgrenze von 300 °C zu überdenken ist, da hierbei ein erhöhter Verschleiß auftritt. Um den Verschleiß zu analysieren, wird nach der Umformung von Näpfen aus 1.3815 in Stufe 1 bei 300 °C, wobei Bornitrid als Trenn- und Schmiermittel eingesetzt wurde, die Matrizenoberfläche

taktil mithilfe eines Perthometers MarSurf XR 20 der Firma Mahr in Anlehnung an die Norm DIN 4768 [156] charakterisiert. Hierbei werden fünf Profile im Kontaktbereich der Matrize mit dem Werkstück gewählt. Die ermittelten Rauheitswerte, der arithmetische Mittenrauwert R_a , die Rautiefe R_z und die maximale Rautiefe R_{max} , sind Bild 23 a) zu entnehmen.

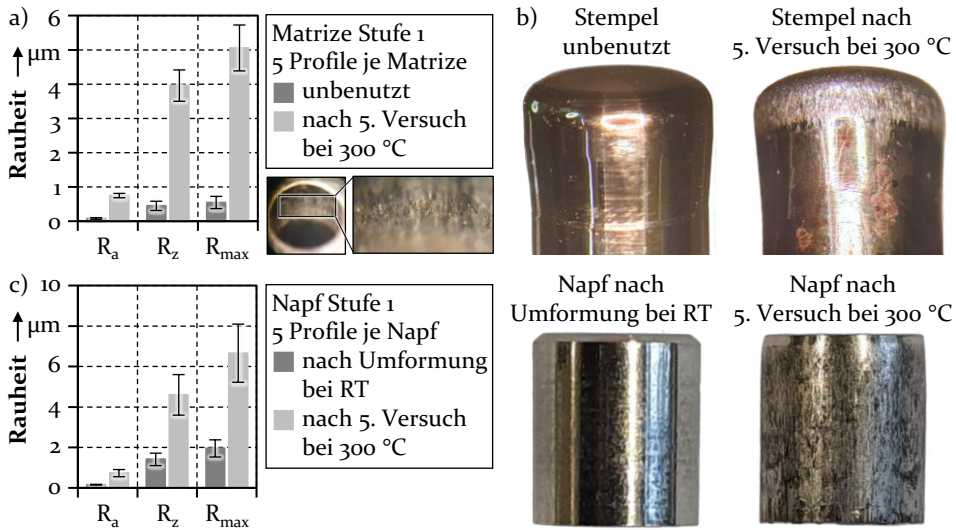


Bild 23: Oberflächenbeschaffenheit von a) Matrize und b) Stempel vor und nach der Umformung bei 300 °C sowie von c) Näpfen nach der Umformung bei RT und 300 °C

Bereits nach fünf Versuchen sind die ermittelten Rauheitswerte R_a , R_z und R_{max} bei der für die Umformung bei 300 °C eingesetzten Matrize im Vergleich zu einer unbenutzten Matrize um etwa das Neunfache erhöht. Auch die Oberfläche des für die Versuche genutzten Stempels ist durch eine erhöhte Rauheit gekennzeichnet, welche mit bloßem Auge erkennbar ist, wie aus Bild 23 b) hervorgeht. Die Zunahme der Rauheit der Aktivteiloberflächen, welche sich im direkten Kontakt mit dem Werkstück befinden, führt in der Folge innerhalb einer lediglich geringen Anzahl an Umformversuchen auch zu einer höheren Rauheit der Oberfläche der umgeformten Näpfe. Dies ist anhand der Gegenüberstellung von Näpfen nach der Umformung bei Raumtemperatur und 300 °C in Bild 23 c) erkennbar. Nach dem fünften Versuch bei 300 °C sind die für die äußere Napfoberfläche ermittelten Rauheitswerte R_a , R_z und R_{max} um etwa das Dreifache erhöht. Die Ursache für die erhöhte Rauheit liegt in der Zunahme der Reibung bei erhöhter Temperatur [157], auf welche die Erhöhung der im Rahmen der Werkstoffcharakterisierung ermittelten Reibfaktoren hinweist. Demnach ist bei der Umformung des druckaufgestickten Stahls 1.3815 bei 300 °C der Reibfaktor im Vergleich zu Raumtemperatur mehr als doppelt so hoch und

beträgt verglichen mit 200 °C das Eineinhalbfache. Die Zunahme der Reibung infolge der Temperaturerhöhung wiederum kann durch die Veränderung der Viskosität des eingesetzten Schmierstoffs [134] oder auch durch das Abreißen des Schmierfilms [135] begründet sein.

Analog zu den ermittelten erhöhten Rauheitswerten für die umgeformten Näpfe ist infolge der Zunahme der Rauheit der Matrice auch eine gesteigerte Rauheit der Nieten nach Stufe 2 bei 300 °C zu erwarten. Wie in [158] dargelegt, hat die Oberflächenbeschaffenheit von Nieten einen Einfluss auf die Reibung beim Fügen, wobei eine höhere Reibung zur Ausbildung eines geringeren Hinterschnitts führt. Vor diesem Hintergrund ist davon auszugehen, dass sich die verringerte Oberflächenqualität von bei 300 °C umgeformten Nieten nachteilig auf die Verbindungsausbildung und folglich auf die Verbindungsfestigkeit auswirkt. Dieses Risiko überwiegt die mit einer Umformung von 1.3815 bei 300 °C verbundenen Vorteile hinsichtlich der verbesserten Umformbarkeit und der gesteigerten Verfestigung. Als Resultat aus diesen Erkenntnissen erfolgt eine Eingrenzung des für die Nietherstellung als geeignet angesehenen Temperaturbereichs mit Raumtemperatur als unterer Grenze und 200 °C als oberer Grenze.

Identifikation von Ursachen für grundlegende Temperatureffekte

Beim Napf-Rückwärts-Fließpressen des druckaufgestickten Stahls 1.3815 in Stufe 1 bei Raumtemperatur und bei 200 °C ergeben sich Unterschiede in Bezug auf die erreichte Napfgeometrie, wenn bei beiden Umformtemperaturen der gleiche Stempelweg eingestellt wird, wie aus dem nachfolgenden Bild 24 hervorgeht.

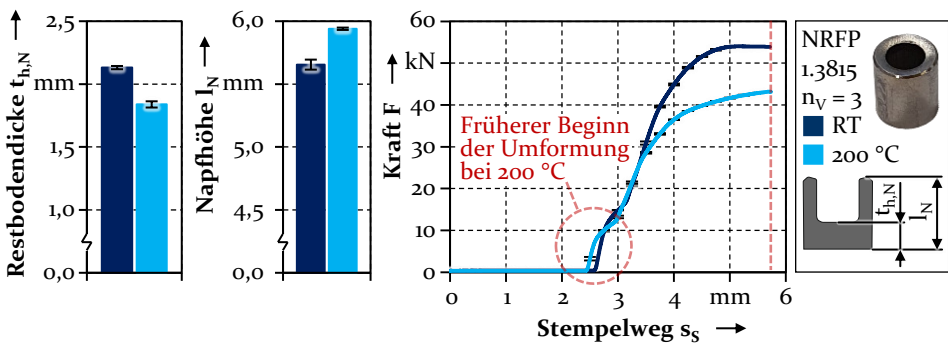


Bild 24: Unterschiede bezüglich der erreichten Napfgeometrie und des Kraft-Weg-Verlaufs infolge des Temperatureinflusses beim Napf-Rückwärts-Fließpressen von 1.3815

Trotz des gleichen Stempelwegs bei 200 °C wird eine um 0,29 mm geringere Restbodendicke der Näpfe im Vergleich zur Restbodendicke von $2,13 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ bei Raumtemperatur erreicht, was eine Verringerung

um fast 14 % bedeutet. Die ebenfalls festzustellende Vergrößerung der Napfhöhe hängt direkt mit der Verringerung der Restbodendicke zusammen, da der Napfinnendurchmesser durch den Stempel und der Napfaußendurchmesser durch die Matrize festgelegt ist. Die in Bild 24 dargestellten experimentellen Kraft-Weg-Verläufe, welche auf Basis der während des Versuchs aufgezeichneten Maschinendaten ausgeleitet sind, beinhalten den Vorlaufweg des Stempels. Im Anschluss an den Vorlaufweg, sobald der Stempel sich in Kontakt mit dem Werkstück befindet, beginnt die eigentliche Umformung und der damit verbundene Kraftanstieg.

Es fällt auf, dass der mit dem Beginn der Umformung zusammenhängende Kraftanstieg bei 200 °C nach einem geringeren Vorlaufweg als bei Raumtemperatur eintritt. Dies ist auf die thermische Ausdehnung des Werkzeugs und des Rohlings zurückzuführen. Es ist ersichtlich, dass eine Versuchsdurchführung bei gleichem Stempelweg bei 200 °C durch den früher einsetzenden Beginn der Umformung im Erreichen eines größeren Umformwegs im Vergleich zu Raumtemperatur resultiert. Dies hat wiederum einen Einfluss auf die erreichte Restbodendicke der Näpfe nach der Umformung. Soll bei 200 °C eine vergleichbare Napfgeometrie wie bei Raumtemperatur erreicht werden, müssen derartige Einflüsse kompensiert werden. Der in solchen Fällen häufig genutzte Ansatz Trial-and-Error erlaubt keine gezielte Kompensierung der Abweichungen. Um diesen zeit- und kostenaufwendigen Ansatz zu vermeiden, soll eine analytisch basierte methodische Vorgehensweise abgeleitet werden, wodurch es ermöglicht wird, die Restbodendicke der Näpfe durch eine entsprechende Adaption des Stempelwegs gezielt anzupassen.

Hierfür müssen zunächst die Ursachen für die infolge der Temperaturerhöhung auftretenden Unterschiede bezüglich der erreichten Restbodendicke der Näpfe identifiziert werden. Auf Basis theoretischer Überlegungen ergeben sich vier grundsätzliche potentielle Ursachen, welche in Tabelle 7 zusammengefasst sind. Den identifizierten Ursachen werden jeweils die daraus folgenden Primäreffekte zugeordnet, welche schließlich in einer Veränderung der Restbodendicke von bei 200 °C umgeformten Näpfen im Vergleich zu bei Raumtemperatur umgeformten Näpfen als Sekundäreffekt resultieren. Diese theoretisch hergeleiteten Ursachen werden im Folgenden ausführlicher erläutert, diskutiert und überdies anhand von experimentellen Untersuchungen untermauert. Zu diesem Zweck werden die experimentellen Ergebnisse von drei Versuchsvarianten bei 200 °C zusätzlich zu Referenzversuchen bei Raumtemperatur herangezogen. Eine Übersicht über die durchgeführten Versuche ist in Bild 25 gegeben.

Tabelle 7: Ursachen für die Abweichung der Restbodendicke Δt der bei 200 °C umgeformten Näpfe im Vergleich zu Raumtemperatur nach [151]

Ursache	Primäreffekt	Sekundäreffekt
Wärmeausdehnung von Aktivteilen und Rohling	Früherer Beginn der Umformung → Längerer Umformweg bei gleichem Stempelweg	$\Delta t_{\text{Ausdehnung}}$
Reduzierung von F_{max} aufgrund der verbesserten Umformbarkeit	Geringere Maschinenauffederung und elastische Deformation der Aktivteile	$\Delta t_{F_{\text{max}}}$
Reduzierung von $R_{p0,2}$ aufgrund der verbesserten Umformbarkeit	Geringerer linear-elastischer Bereich → Geringere elastische Deformation des Bauteils	Δt_{R_p}
Abkühlen des Bauteils nach der Umformung	Schrumpfung des Bauteils	$\Delta t_{\text{Abkühlen}}$

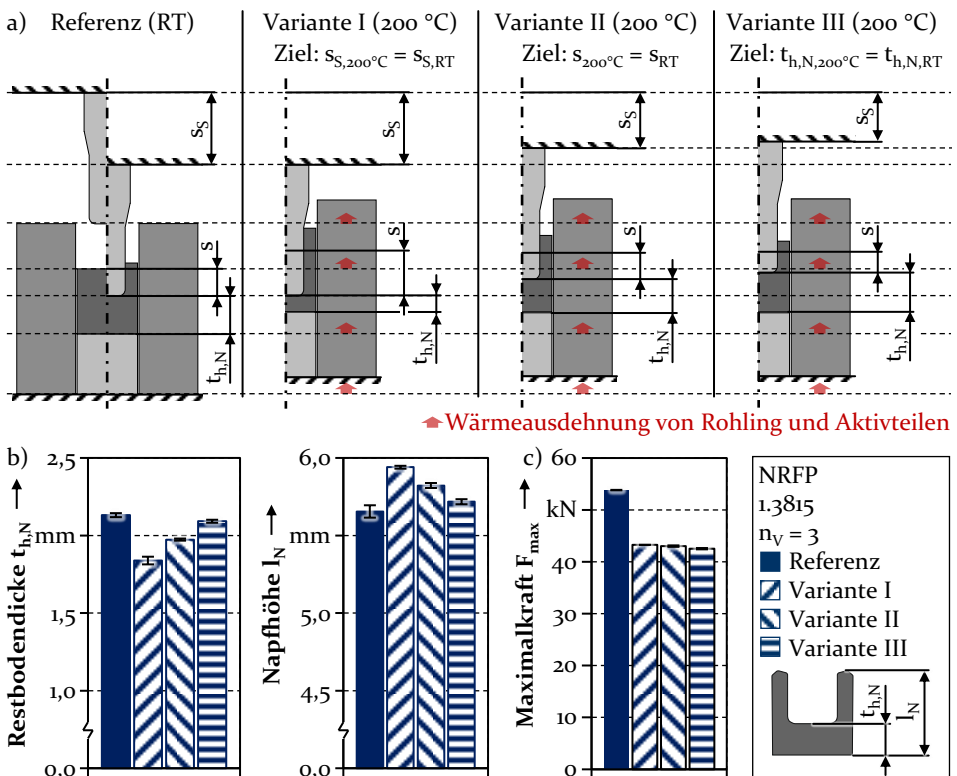


Bild 25: Variantenuntersuchung nach [151]: a) Untersuchte Varianten für die Analyse des Temperatureinflusses auf b) geometrische Parameter der Näpfe und c) Maximalkräfte

Den drei Variantenuntersuchungen liegen unterschiedliche Zielgrößen zugrunde, welche als Kriterium der Vergleichbarkeit dienen. Für Variante I wird der Stempelweg s_s gleich dem Stempelweg bei den Referenzversuchen gesetzt. Für Variante II gilt als Kriterium, dass ein vergleichbarer Umformweg s wie bei der Referenz erzielt wird. Der Beginn des Umformwegs wird im Zusammenhang mit dem Überschreiten eines definierten Schwellenwerts der Umformkraft von 0,5 kN festgelegt. Für Variante III ist das Ziel, eine vergleichbare Restbodendicke $t_{h,N}$ wie bei der Referenz zu erreichen.

Wie bereits anhand von Bild 24 aufgezeigt, beginnt bei 200 °C die Umformung früher als bei Raumtemperatur, wodurch sich bei gleichem Stempelweg ein um 0,2 mm größerer Umformweg für Variante I im Vergleich zur Referenz ergibt. Dem Effekt der früher einsetzenden Umformung und des damit verbundenen vergrößerten Umformwegs liegt die thermische Ausdehnung des Werkzeugs, im Wesentlichen der Aktivteile, und des Rohlings als Ursache zugrunde, worauf sich die Verringerung der Restbodendicke bei 200 °C folglich zurückführen lässt. Um diese thermische Ausdehnung zu kompensieren, wird der Stempelweg so weit verringert, dass ein vergleichbarer Umformweg wie beim Referenzversuch erzielt wird, weshalb für Variante II ein um 0,2 mm geringerer Stempelweg gewählt wird. Hierdurch kann die Wärmeausdehnung der Aktivteile und des Rohlings als Ursache für das Erreichen einer abweichenden Restbodendicke ausgeschlossen werden. In Fall von Variante II weisen die Näpfe noch immer eine um etwa 7 % geringere Restbodendicke im Vergleich zur Referenz auf. Erst durch eine weitere Verringerung des Stempelwegs um 0,1 mm bei Variante III wird eine vergleichbare Restbodendicke wie bei den Referenzversuchen erreicht. Anhand dessen lässt sich belegen, dass nicht nur die Wärmeausdehnung des Werkzeugs und des Rohlings, aus welcher sich infolge des früheren Beginns der Umformung ein größerer Umformweg ergibt, eine Ursache für die Veränderung der Restbodendicke bei 200 °C ist. Vielmehr spielen auch die Unterschiede in Bezug auf die erforderliche maximale Prozesskraft bei 200 °C im Vergleich zu Raumtemperatur eine Rolle. Auf Basis der experimentellen Untersuchungen ist festzustellen, dass die Maximalkraft bei den drei Varianten im Vergleich zur Referenz um etwa 20 % verringert ist. Diese Kraftreduzierung basiert auf der temperaturbedingten Reduzierung der Fließspannung aufgrund des thermisch aktivierten Gleitens von Versetzungen im Werkstoff [150]. Wie in [159] dargelegt, besteht ein Zusammenhang zwischen Prozesskräften und Maschinen- sowie Werkzeugauffederung, wodurch der tatsächliche Stempelweg und schließlich die erreichte Werkstückgeometrie beeinflusst werden. Dementsprechend bewirkt im Fall der durchgeführten Variantenuntersuchungen

die geringere maximale Prozesskraft bei 200 °C wiederum eine geringere Maschinenauffederung und elastische Deformation der Werkzeugaktivteile im Vergleich zur Referenz, was bei Nutzung eines vergleichbaren Stempelwegs einen Einfluss auf die erzielte Restbodendicke hat. Aus diesem Grund stellt neben der Wärmeausdehnung auch die temperaturbedingte Kraftreduzierung eine Ursache für die ermittelten Unterschiede der Restbodendicke dar. Des Weiteren wurde im Rahmen der Werkstoffcharakterisierung von 1.3815 neben der Reduzierung der Fließspannung eine Verringerung der Fließgrenze bei 200 °C im Vergleich zu Raumtemperatur festgestellt. Solange die auftretenden Spannungen unterhalb der Fließgrenze liegen, treten elastische Formänderungen auf [69]. Da die Reduzierung der Fließgrenze demgemäß in Zusammenhang mit einem geringeren linear-elastischen Bereich und folglich einer geringeren elastischen Deformation sowie Rückfederung der umgeformten Bauteile steht, wird hierdurch ebenso die Restbodendicke beeinflusst. Folglich liegt in der Reduzierung der Fließgrenze bei erhöhter Temperatur eine weitere Ursache für das Erreichen unterschiedlicher Restbodendicken in Abhängigkeit von der Umformtemperatur. Ferner ist das Abkühlen nach der Umformung bei erhöhter Temperatur als Ursache zu berücksichtigen. Wie in [119] erläutert, hängt die final erreichte Bauteilgeometrie nicht nur von der thermischen Ausdehnung der Aktivteile und der elastischen Deformation ab, sondern auch von der Wärmeschrumpfung der Bauteile selbst. Werden die Näpfe aus 1.3815 bei erhöhter Temperatur umgeformt, tritt infolge des Abkühlens nach dem Prozessende eine Schrumpfung des Bauteils ein, was zu einer Veränderung der Restbodendicke im Vergleich zur Bauteilgeometrie im warmen Zustand führt.

Zusammenfassend sind somit vier grundlegende Ursachen für die Abweichung der Restbodendicke von bei 200 °C umgeformten Näpfen im Vergleich zu bei Raumtemperatur hergestellten Näpfen identifizierbar. Diese umfassen die Wärmeausdehnung der Aktivteile und des Rohlings, die Reduzierung der Maximalkraft und der Fließgrenze infolge der verbesserten Umformbarkeit bei erhöhter Temperatur sowie das Abkühlen des Bauteils (vergleiche Tabelle 7). Um die Einflusstärke der ermittelten Ursachen bewerten zu können, werden die Einflüsse im Folgenden quantifiziert.

Quantifizierung des Einflusses der identifizierten Ursachen

Für die Quantifizierung der Einflüsse der identifizierten Ursachen auf den Unterschied bezüglich der erreichten Restbodendicke der Näpfe bei Raumtemperatur und bei 200 °C wird ein analytischer Ansatz gewählt. Anhand

dessen wird näherungsweise berechnet, welcher Unterschied der Restbodendicke sich aufgrund jeder einzelnen Ursache ergibt, um somit den anteiligen Einfluss jeder Ursache bewerten zu können. Die Abweichung $\Delta t_{h,N}$ der Restbodendicke zwischen der Restbodendicke $t_{h,N,RT}$ für die Referenz bei Raumtemperatur und $t_{h,N,200^\circ\text{C}}$ für die Variante I bei 200°C , welcher, wie zuvor ermittelt, $0,29\text{ mm}$ beträgt, setzt sich auf Basis der identifizierten Ursachen aus Tabelle 7 entsprechend Gleichung 4 zusammen. Die näherungsweise Berechnung der in der Gleichung angegebenen Deltawerte wird im Folgenden detailliert erläutert.

$$\begin{aligned}\Delta t_{h,N} &= t_{h,N,RT} - t_{h,N,200^\circ\text{C}} \\ &= |\Delta t_{\text{Ausdehnung}}| + |\Delta t_{Fmax}| + |\Delta t_{Rp}| + |\Delta t_{Abkühlen}|\end{aligned}\quad (4)$$

Der Deltawert $\Delta t_{\text{Ausdehnung}}$ basiert auf der Wärmeausdehnung der Aktivteile des Umformwerkzeugs und des Rohlings, wie aus Bild 26 hervorgeht. Die Ausdehnung führt dazu, dass der Stempel bei der Umformung bei 200°C früher in Kontakt mit dem Rohling kommt als bei Raumtemperatur. Bei gleichem Stempelweg s_S ergibt sich dadurch ein größerer Umformweg $s_{200^\circ\text{C}}$ bei 200°C als s_{RT} bei Raumtemperatur und ein geringerer Abstand zwischen Stempel und Gegenstempel am Prozessende. Die hieraus resultierende Abweichung $\Delta t_{\text{Ausdehnung}}$ der Restbodendicke entspricht folglich der Differenz Δs des Umformwegs bei 200°C und Raumtemperatur, welcher sich auf Basis der Auswertung der experimentellen Kraft-Weg-Daten aus den zuvor durchgeführten Variantenuntersuchungen zu $\Delta s = 0,2\text{ mm}$ ergibt. Die Abweichung $\Delta t_{\text{Ausdehnung}}$ wird dementsprechend durch Gleichung 5 beschrieben.

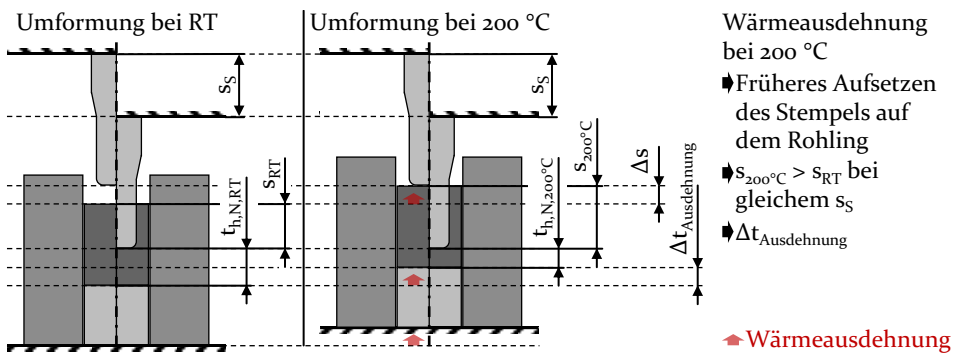


Bild 26: Schematische Darstellung der Abweichung $\Delta t_{\text{Ausdehnung}}$ nach [151]

$$\Delta t_{\text{Ausdehnung}} = \Delta s = s_{200^\circ\text{C}} - s_{RT}\quad (5)$$

Die Differenz $\Delta t_{F_{\max}}$ resultiert indirekt aus der Reduzierung der maximalen Prozesskraft $F_{\max}$ bei 200 °C im Vergleich zu Raumtemperatur, da sich $F_{\max}$ auf die Maschinenauffederung und die elastische Deformation der Aktivteile auswirkt. Grundsätzlich bestehen nach der Umformung unabhängig von der Prozesstemperatur Abweichungen der Bauteilgeometrie im Vergleich zu einem idealen Umformprozess, in welchem die Maschinenauffederung keinen Einfluss hätte. Daher ergibt sich auch bei Raumtemperatur eine Abweichung der tatsächlich erreichten Restbodendicke verglichen mit einer idealen Umformung. Diese unterscheidet sich zusätzlich aufgrund der unterschiedlichen Maximalkräfte und der damit verbundenen Maschinenauffederung und elastischen Deformation von der Abweichung der Restbodendicke im Falle einer Umformung bei 200 °C. Aus der Differenz der Abweichungen ergibt sich somit infolge der veränderten Maschinenauffederung der Unterschied Δt_{Presse} der Restbodendicke bei 200 °C und bei Raumtemperatur. Ebenso führt die veränderte elastische Deformation des Stempels und des Gegenstempels zu den entsprechenden Differenzen $\Delta t_{\text{Stempel}}$ und $\Delta t_{\text{Gegenstempel}}$ der Restbodendicke. Der Deltawert $\Delta t_{F_{\max}}$ kann somit gemäß nachfolgender Gleichung 6 aufgeschlüsselt werden.

$$\Delta t_{F_{\max}} = \Delta t_{\text{Presse}} + \Delta t_{\text{Stempel}} + \Delta t_{\text{Gegenstempel}} \quad (6)$$

Der Deltawert Δt_{Presse} zwischen den Abweichungen der Restbodendicke bei Raumtemperatur und bei 200 °C infolge der Maschinenauffederung im Vergleich zur idealen Umformung ist schematisch in Bild 27 dargestellt und lässt sich mittels Gleichung 7, welche auf Gleichung 2 basiert, abschätzen. Hierbei wird Δt_{Presse} in Abhängigkeit von den experimentell ermittelten maximalen Prozesskräften $F_{\max, \text{RT}} = 53,8 \text{ kN}$ bei Raumtemperatur und $F_{\max, 200^\circ\text{C}} = 43,3 \text{ kN}$ bei 200 °C sowie der Steifigkeit der Presse $C = 386 \text{ kN/mm}$ berechnet.

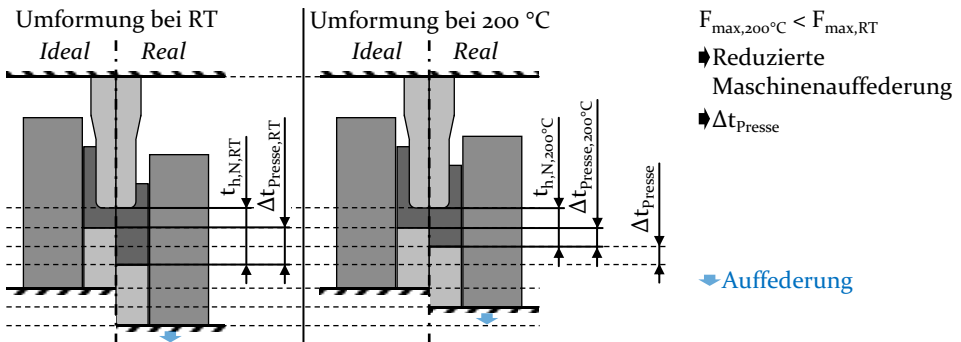


Bild 27: Schematische Darstellung der Abweichung Δt_{Presse}

$$\Delta t_{\text{Presse}} = \Delta t_{\text{Presse,RT}} - \Delta t_{\text{Presse,200}^\circ\text{C}} = \frac{F_{\text{max,RT}}}{C} - \frac{F_{\text{max,200}^\circ\text{C}}}{C} \quad (7)$$

Der Deltawert $\Delta t_{\text{Stempel}}$ ergibt sich aus der elastischen Deformation des Stempels, wie es in Bild 28 veranschaulicht ist. Die näherungsweise Berechnung von $\Delta t_{\text{Stempel}}$ erfolgt mithilfe von Gleichung 8 auf Basis von Gleichung 1. Neben den bereits genannten maximalen Prozesskräften bei Raumtemperatur und bei 200 °C wird hierfür der E-Modul $E = 665 \text{ GPa}$ des für den Napf-Rückwärts-Fließpress-Stempel eingesetzten Werkstoffs entsprechend den Herstellerangaben herangezogen. Da der Stempel unterschiedliche Durchmesser entlang der gesamten Stempellänge aufweist, wird eine theoretische Einteilung in zehn Bereiche vorgenommen, für welche jeweils die elastische Deformation in Abhängigkeit vom Durchmesser d_i und der Länge l_i des jeweiligen Bereichs ermittelt wird.

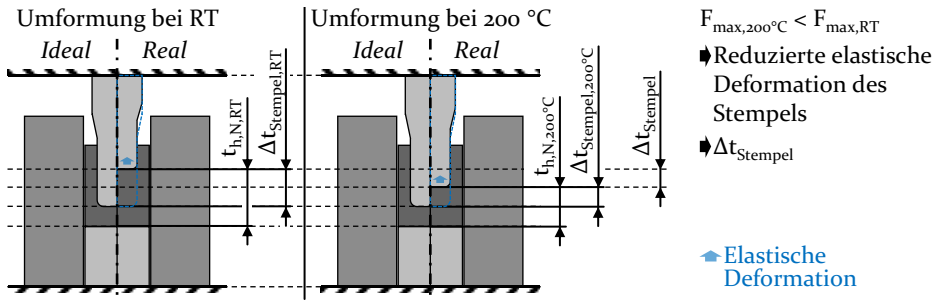
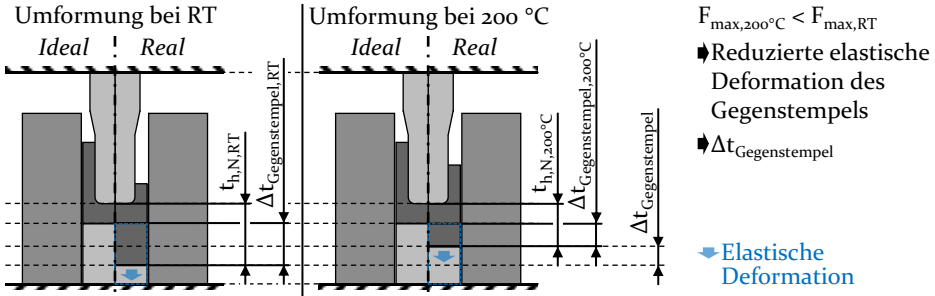


Bild 28: Schematische Darstellung der Abweichung $\Delta t_{\text{Stempel}}$

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{Stempel}} &= \Delta t_{\text{Stempel,RT}} - \Delta t_{\text{Stempel,200}^\circ\text{C}} \\ &= \sum_{i=1}^{10} \left(\frac{F_{\text{max,RT}} \cdot l_i}{\pi \cdot (d_i/2)^2 \cdot E} \right) - \sum_{i=1}^{10} \left(\frac{F_{\text{max,200}^\circ\text{C}} \cdot l_i}{\pi \cdot (d_i/2)^2 \cdot E} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

Der Deltawert $\Delta t_{\text{Gegenstempel}}$ basiert auf der elastischen Deformation des Gegenstempels. Dies ist schematisch in Bild 29 dargestellt. Für die vereinfachte Berechnung von $\Delta t_{\text{Gegenstempel}}$ wird Gleichung 9 genutzt, welcher ebenfalls Gleichung 1 zugrunde liegt. Es wird der E-Modul $E = 560 \text{ GPa}$ des Werkstoffs entsprechend den Herstellerangaben eingesetzt, welcher für den Gegenstempel mit einem Durchmesser $d = 5,31 \text{ mm}$ und einer Länge $l = 21,00 \text{ mm}$ verwendet wird.


 Bild 29: Schematische Darstellung der Abweichung $\Delta t_{\text{Gegenstempel}}$

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{Gegenstempel}} &= \Delta t_{\text{Gegenstempel,RT}} - \Delta t_{\text{Gegenstempel,200}^\circ\text{C}} \\ &= \frac{F_{\text{max,RT}} \cdot l}{\pi \cdot (d/2)^2 \cdot E} - \frac{F_{\text{max,200}^\circ\text{C}} \cdot l}{\pi \cdot (d/2)^2 \cdot E} \end{aligned} \quad (9)$$

Anhand der Berechnungen von Δt_{Presse} , $\Delta t_{\text{Stempel}}$ und $\Delta t_{\text{Gegenstempel}}$ mithilfe der Gleichungen 7 bis 9 ergibt sich gemäß Gleichung 6 die aus dem Unterschied der Maximalkraft bei Raumtemperatur und bei 200 °C resultierende Abweichung der Restbodendicke zu $\Delta t_{\text{Fmax}} = 0,075 \text{ mm}$.

Als dritte Ursache für die Abweichungen der Restbodendicke wurde die Reduzierung der Fließgrenze bei 200 °C im Vergleich zu Raumtemperatur identifiziert, da sich hieraus ein geringerer linear-elastischer Bereich und damit eine verringerte elastische Deformation des Werkstücks bei der Umformung ergibt. Hierauf ist der Deltawert Δt_{Rp} zurückzuführen, welcher der Differenz der Anteile der elastischen Deformation und Rückfederung in Bezug auf die Restbodendicke $\Delta t_{\text{Rp,RT}}$ bei Raumtemperatur und $\Delta t_{\text{Rp,200}^\circ\text{C}}$ bei 200 °C entspricht. Eine Abschätzung für Δt_{Rp} wird anhand Gleichung 10 getroffen, welche aus Gleichung 1 hervorgeht. Hierfür werden die im Rahmen der Werkstoffcharakterisierung ermittelten Werte für die Fließgrenze des druckaufgestickten Stahls $R_{p0,2|RT} = 773,6 \text{ MPa}$ bei Raumtemperatur und $R_{p0,2|200^\circ\text{C}} = 522,1 \text{ MPa}$ bei 200 °C, der E-Modul $E = 196 \text{ GPa}$ von 1.3815 entsprechend den Herstellerangaben und die Ausgangshöhe $h = 4,72 \text{ mm}$ des verwendeten Rohlings eingesetzt. Für Δt_{Rp} wird dementsprechend ein Wert von 0,006 mm berechnet.

$$\Delta t_{\text{Rp}} = \Delta t_{\text{Rp,RT}} - \Delta t_{\text{Rp,200}^\circ\text{C}} \approx \frac{R_{p0,2|RT} \cdot h}{E} - \frac{R_{p0,2|200^\circ\text{C}} \cdot h}{E} \quad (10)$$

Infolge der Abkühlung und Schrumpfung des Bauteils nach der Umformung bei 200 °C wird die Restbodendicke zusätzlich reduziert. Im Gegensatz zu der Umformung bei Raumtemperatur entsteht demnach eine Abweichung $\Delta t_{\text{Abkühlen}}$ in Bezug auf die Restbodendicke $t_{\text{Prozessende,200°C}}$, welche nach dem Ende des Umformvorgangs, aber noch vor dem Abkühlen des Bauteils erreicht wird. Die Abweichung $\Delta t_{\text{Abkühlen}}$ wird unter Verwendung von Gleichung 11 entsprechend Gleichung 3 in Abhängigkeit vom Wärmeausdehnungskoeffizient $\alpha = 12 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ von 1,3815 gemäß den Herstellerangaben und von der Temperaturdifferenz $\Delta T = 177 \text{ K}$ abgeschätzt.

$$\Delta t_{\text{Abkühlen}} = t_{\text{Prozessende,200°C}} \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (11)$$

Die Restbodendicke $t_{\text{Prozessende,200°C}}$ vor dem Abkühlvorgang wird mittels Gleichung 12 näherungsweise bestimmt. Unter idealen Bedingungen ohne Wärmeausdehnung, Abkühlen, Maschinenauffederung sowie elastische Deformation von Stempel und Gegenstempel würde die theoretische Restbodendicke $t_{h,N,\text{ideal}} = 1,66 \text{ mm}$ erreicht werden, welche dem minimalen Abstand zwischen Stempel und Gegenstempel in Abhängigkeit vom gewählten Stempelweg entspricht. Diese theoretische Restbodendicke dient als Ausgangsgröße für die Berechnung von $\Delta t_{\text{Prozessende,200 °C}}$ unter Berücksichtigung der zuvor genannten Einflussfaktoren. Hiermit ergibt sich anhand von Gleichung 11 für $\Delta t_{\text{Abkühlen}}$ ein Wert von 0,005 mm.

$$\begin{aligned} \Delta t_{\text{Prozessende,200°C}} &= t_{h,N,\text{ideal}} - \Delta t_{\text{Ausdehnung}} \\ &+ \Delta t_{\text{Presse,200°C}} + \Delta t_{\text{Stempel,200°C}} \\ &+ \Delta t_{\text{Gegenstempel,200°C}} + \Delta t_{\text{Rp,200°C}} \end{aligned} \quad (12)$$

In nachfolgender Tabelle 8 sind die Ergebnisse der Berechnungen für die aus den vier identifizierten Ursachen resultierenden Deltawerte der Restbodendicke in Bezug auf die Referenz und die Variante I für 1,3815 zusammengefasst. Hierauf basierend ist den Ursachen der prozentuale Anteil am Unterschied der Restbodendicke zugeordnet. Die Berechnung der Abweichung der Restbodendicke $\Delta t_{h,N}$ wird gemäß Gleichung 4 vorgenommen. Der analytisch berechnete Wert für $\Delta t_{h,N}$ weist eine hohe Übereinstimmung mit dem zuvor im Rahmen der experimentellen Variantenuntersuchungen ermittelten Wert von 0,29 mm auf. Die Genauigkeit der analytischen Berechnungen wird somit als ausreichend angenommen. Auf Basis der Berechnungen kann die Wärmeausdehnung der Aktivteile und des Rohlings als Hauptursache für die Verringerung der Restbodendicke bei 200 °C im Vergleich zu Raumtemperatur identifiziert werden, da dem Einfluss der Wärmeausdehnung ein prozentualer Anteil von fast 70 % an der

Verringerung der Restbodendicke zugewiesen ist. Mehr als 28 % in Summe sind der verbesserten Umformbarkeit bei erhöhter Temperatur in Form der Reduzierung von $F_{\max}$ und $R_{p0,2}$ zuordenbar, wodurch das Potential, die verbesserte Umformbarkeit bei 200 °C für den Nietherstellprozess zu nutzen, unterstrichen wird. Der Einfluss des Abkühlvorgangs nach der Umformung kann hingegen als vernachlässigbar angesehen werden.

Tabelle 8: Quantifizierter anteiliger Einfluss der Ursachen an der Abweichung der Restbodendicke $\Delta t_{h,N}$ der bei 200 °C umgeformten Näpfe im Vergleich zu RT nach [151]

Ursache	Anteiliger Einfluss auf $\Delta t_{h,N}$		
	(-)	(mm)	(%)
Wärmeausdehnung	$\Delta t_{\text{Ausdehnung}}$	0,200	69,7
Verbesserte Umformbarkeit (Reduzierung von $F_{\max}$)	$\Delta t_{F_{\max}}$	0,075	26,3
Verbesserte Umformbarkeit (Reduzierung von $R_{p0,2}$)	Δt_{R_p}	0,006	2,1
Abkühlen	$\Delta t_{\text{Abkühlen}}$	0,005	1,9
Gesamt	$\Delta t_{h,N}$	0,287	100,0

Zusammenfassung

Eine relevante Erkenntnis, die aus den grundlegenden Untersuchungen zum Temperatureinfluss hervorgeht, ist, dass die Zusammenhänge zwischen dem gewählten Stempelweg, dem Umformweg und den resultierenden Größen wie der Restbodendicke der Näpfe und dementsprechend auch der Kopfdicke der Niete von der Prozess Temperatur beeinflusst werden. Die Steuerung des Prozesses auf Basis der ermittelten Zusammenhänge kann mithilfe der abgeleiteten analytisch basierten Methode (Bild 30) erfolgen.

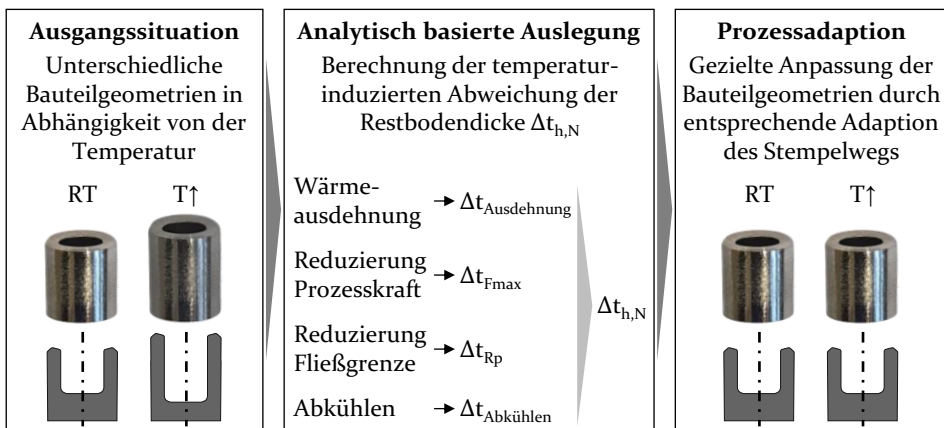


Bild 30: Analytisch basierte Methode zur gezielten Anpassung der Bauteilgeometrie

Da anhand der analytisch basierten Auslegung die Vorhersage der erreichten Restbodendicke oder Kopfdicke möglich ist, kann diese gezielt korrigiert werden. Auf diese Weise kann durch die Anpassung des Stempelwegs beispielsweise der infolge der Wärmeausdehnung vergrößerte Umformweg gezielt kompensiert und somit der Einfluss der Wärmeausdehnung eliminiert werden, um den Temperatureinfluss auf die mechanischen Bauteileigenschaften unter Ausschluss der damit verbundenen Änderungen der Bauteilgeometrie zu untersuchen. Anhand dessen wird bei den durchgeführten Variantenuntersuchungen je nach Untersuchungsziel einer der Parameter konstant gehalten und die damit zusammenhängende Veränderung der anderen Parameter berücksichtigt, wodurch ein Kriterium der Vergleichbarkeit geschaffen wird. Die Nutzung der erarbeiteten analytisch basierten Methode ist daher essentiell für die Analyse der prozess- und werkstoffseitigen Einflussgrößen bei der Nietherstellung.

6.3 Analyse prozessseitiger Einflussgrößen

Bei der Analyse der prozessseitigen Einflussgrößen auf den Umformprozess und die Bauteileigenschaften liegt der Fokus auf den zuvor festgelegten Einflussgrößen, für welche das Potential zur Nutzung der Kenntnis der Einflüsse für die Beeinflussung des Prozesses und der Bauteileigenschaften als hoch erachtet wird. Dementsprechend wird in den nachfolgenden Abschnitten der Einfluss der Umformtemperatur einschließlich unterschiedlicher Temperaturkombinationen im mehrstufigen Umformprozess, der erreichten Restbodendicke der Näpfe als Umformergebnis nach Stufe 1 und der Ausgangsmaße der verwendeten Rohlinge analysiert. Zu den untersuchten Ergebnisgrößen in Bezug auf den Nietherstellprozess zählen der Werkstofffluss und die Verfestigung, die Prozesskräfte sowie die Werkzeugbeanspruchung. Bei den Ergebnisgrößen bezüglich der resultierenden Bauteileigenschaften stehen die Nietgeometrie, -härte und -festigkeit im Vordergrund.

6.3.1 Umformtemperatur bei konstantem Stempelweg

Um den Einfluss der Umformtemperatur zu untersuchen, wird die experimentelle Nietherstellung unter Nutzung des hochstickstofflegierten Stahls 1.3815 als Nietwerkstoff sowohl bei Raumtemperatur als auch bei 200 °C mit derselben Prozesstemperatur in beiden Umformstufen durchgeführt. Eine Übersicht über die untersuchten Varianten ist in Tabelle 9 gegeben.

Tabelle 9: Untersuchte Varianten für die Analyse des Einflusses der Umformtemperatur unter Einhaltung eines konstanten Stempelwegs

Variante	Variation (Variierter Parameter: T)		Kriterium Vergleichbarkeit (Konstanter Parameter)	
	S 1	S 2	S 1	S 2
I	RT	RT	S _S	S _S
II	200 °C	200 °C		

Wie aus den im vorhergehenden Kapitel dargestellten Untersuchungsergebnissen hervorgeht, sind die Zusammenhänge zwischen dem Stempelweg, dem tatsächlichen Umformweg und der erzielten Restbodendicke nach Stufe 1 abhängig von der Umformtemperatur. Als Kriterium der Vergleichbarkeit wird für die Untersuchungen zunächst der Stempelweg für beide Temperaturen konstant gehalten. Daher ist bei der nachfolgenden Analyse des Einflusses auf den Umformprozess und die Bauteileigenschaften zu berücksichtigen, dass hierdurch in Abhängigkeit von der Temperatur unterschiedliche Umformwege und Restbodendicken erreicht werden.

Einfluss auf den Umformprozess

Um ein grundlegendes Verständnis für den Nietherstellprozess zu erlangen, wird der während der Umformung auftretende Werkstofffluss und die Kaltverfestigung analysiert. Diese Untersuchung dient zudem als Grundlage, um bei der weiterführenden Analyse des Prozesses und der Bauteileigenschaften Ursachen für auftretende Veränderungen zu identifizieren. Aufgrund des Temperatureinflusses auf die Versetzungsbewegung liegt die Vermutung nahe, dass bei 200 °C ein veränderter Werkstofffluss vorliegt. Die Ergebnisse der numerischen Stoffflussanalyse sowie die numerisch ermittelte Verfestigung am Ende der Umformung in Abhängigkeit von der Umformtemperatur sind in Bild 31 für die charakteristischen Prozessablaufschritte dargestellt. In Bezug auf den Stofffluss sind bei der Umformung in Stufe 1 lediglich geringe Unterschiede in Abhängigkeit von der Umformtemperatur festzustellen. Es zeigt sich allerdings, dass der Stofffluss entgegen der Stempelbewegung nach dem Überschreiten des Fließbunds am Stempel (1b) bei 200 °C tendenziell bereits früher eine höhere Geschwindigkeit als bei Raumtemperatur erreicht. In Stufe 2 beginnt bei 200 °C die Ausformung der Nietschneide früher, weshalb bereits beim Aufsetzen des Napfbodens auf dem Gegenstempel (2a) ein erhöhter Werkstofffluss in den unteren Bereich der Kavität der Matrize auftritt. Die Ursache hierfür ist, dass die Näpfe, welche in Stufe 1 bei 200 °C umgeformt werden, eine geringere Restbodendicke und damit eine größere Napfhöhe als die bei Raum-

temperatur umgeformten Näpfe aufweisen. Da derselbe Stempelweg eingestellt ist, wird die thermische Ausdehnung nicht kompensiert, wie aus der zuvor beschriebenen analytischen Analyse hervorgeht.

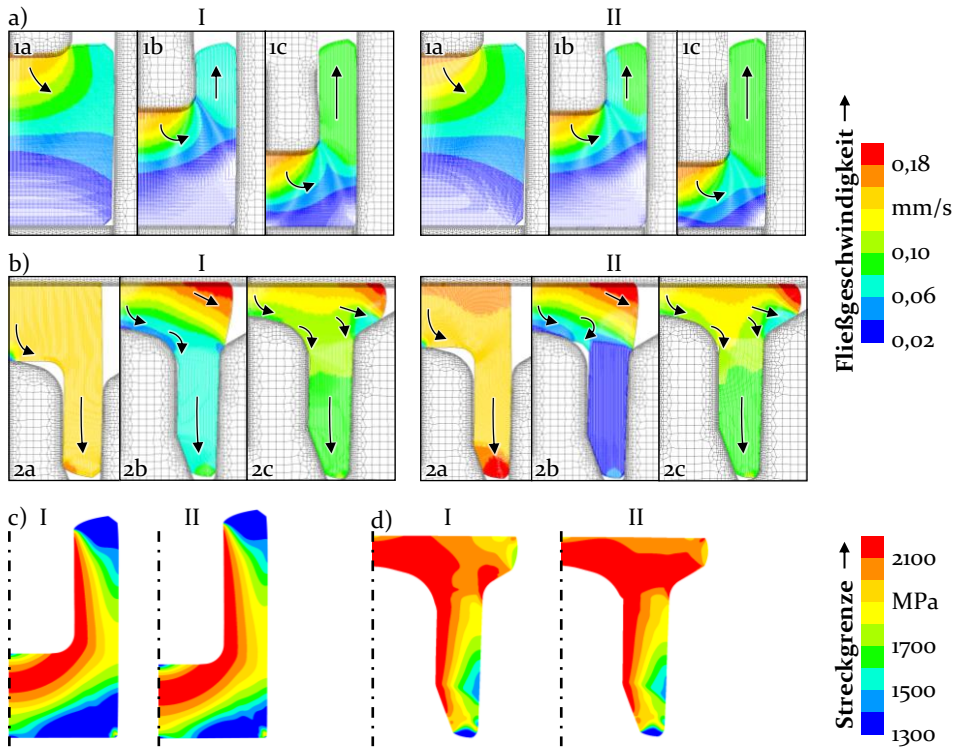


Bild 31: Werkstofffluss und Verfestigung in Abhängigkeit von der Umformtemperatur: Stofffluss in a) Stufe 1 und b) Stufe 2 sowie Streckgrenze am Ende von c) Stufe 1 und d) Stufe 2

Ein relevanter Unterschied hinsichtlich des Stoffflusses ist beim Beginn der Ausformung des Nietkopfes (2b) zu verzeichnen. Bei 200 °C kommt der Stofffluss im Nietschaft zum Erliegen, was bei Raumtemperatur nicht der Fall ist. Dies ist nicht nur dem Einfluss der Umformtemperatur zuzuschreiben, sondern auch der unterschiedlichen Napfhöhe. Es ist anzunehmen, dass hierdurch der radiale Stofffluss nach außen im Nietkopf begünstigt ist und hierdurch ein größerer Kopfdurchmesser erreicht wird. Am Prozessende (2c) ist die Stoffflussgeschwindigkeit im Nietschaft wieder erhöht und erreicht für beide untersuchte Temperaturen ein vergleichbares Niveau. Im Bereich des Nietkopfes allerdings liegen bei 200 °C größere Bereiche mit erhöhter Geschwindigkeit als bei Raumtemperatur vor. Daher ist festzuhalten, dass die Umformung bei 200 °C in Verbindung mit einem begünstigten

Werkstofffluss steht. Die numerische Analyse des Werkstoffverhaltens basiert auf den als Eingangsgrößen verwendeten temperaturabhängigen Fließkurven. Das verringerte Fließspannungsniveau bei erhöhter Umformtemperatur resultiert maßgeblich aus der temperaturbedingten verbesserten Beweglichkeit sowohl von Versetzungen [69] als auch von Stickstoffatomen [100]. Demzufolge lassen sich die anhand der numerischen Analyse identifizierten Veränderungen des Stoffflusses bei 200 °C indirekt auch auf diese Ursachen zurückführen. Der veränderte Stofffluss trägt zu Unterschieden bezüglich der Verfestigung im Bauteil bei. So ist bei Näpfen, welche bei 200 °C umgeformt wurden, der Bereich mit lokalen Festigkeiten von weniger als 1400 MPa im Napfboden im Vergleich zu bei Raumtemperatur umgeformten Näpfen verringert. Gleichzeitig weisen die Näpfe nach der Umformung bei 200 °C in der Napfwand vermehrt Festigkeitswerte von mehr als 1800 MPa auf. Bei Nieten der Variante II werden im Nietkopf und im Übergangsbereich zum Nietschaft größere Bereiche mit lokalen Festigkeiten von über 2100 MPa als bei Nieten der Variante I erzielt. Die Ursache hierfür ist nicht nur die höhere Vorverfestigung, sondern auch die durch den begünstigten Werkstofffluss erleichterte Ausformung des Nietkopfs. Aus der numerischen Analyse der Spannungen im Niet beim Fügen in [25] geht hervor, dass vor allem in den innenliegenden Bereichen des Nietschafts höhere Spannungen als im restlichen Niet auftreten, wobei Maximalwerte von bis zu 1830 MPa erreicht werden. In Bezug hierauf wird die erzielte Festigkeitsverteilung im Niet nach der Umformung, bei welcher für beide Varianten in diesen Bereichen einschließlich Übergang zum Nietkopf lokale Festigkeitswerte von über 2100 MPa vorliegen, als positiv bewertet.

Der temperaturbedingt veränderte Werkstofffluss und die unterschiedliche lokale Verfestigung können Auswirkungen auf die Prozesskräfte und die resultierende Werkzeugbeanspruchung haben. Wie in Bild 32 a) zu erkennen ist, beeinflusst die Umformtemperatur den Kraft-Weg-Verlauf in beiden Umformstufen. Auf Basis der Zuordnung der Prozessablaufschritte zum Kraft-Weg-Verlauf mittels numerischer Analyse, wie es in Bild 20 dargestellt ist, lässt sich aus den Kraft-Weg-Verläufen in Bild 32 a) erschließen, dass der Kontakt zwischen Rohling und Matrize in Stufe 1 (vergleiche 1a in Bild 20) bei 200 °C früher als bei Raumtemperatur eintritt, was anhand der thermischen Ausdehnung des Rohlings und der Matrize in radialer Richtung sowie aufgrund der reduzierten Fließgrenze bei 200 °C erklärbar ist. In Stufe 2 setzt der erste charakteristische Kraftanstieg (vergleiche 2a in Bild 20) bei 200 °C später als bei Raumtemperatur ein. Da derselbe Stempelweg gewählt wird und der Umformweg bei 200 °C somit länger ist, weisen die bei 200 °C umgeformten Näpfe eine geringere Restbodendicke und

eine größere Napfhöhe auf. Infolgedessen erfolgt das Aufsetzen des Napfbodens auf der Spitze des Gegenstempels bei 200 °C später als bei Raumtemperatur, während bereits die Ausformung der Nietschneide stattfindet.

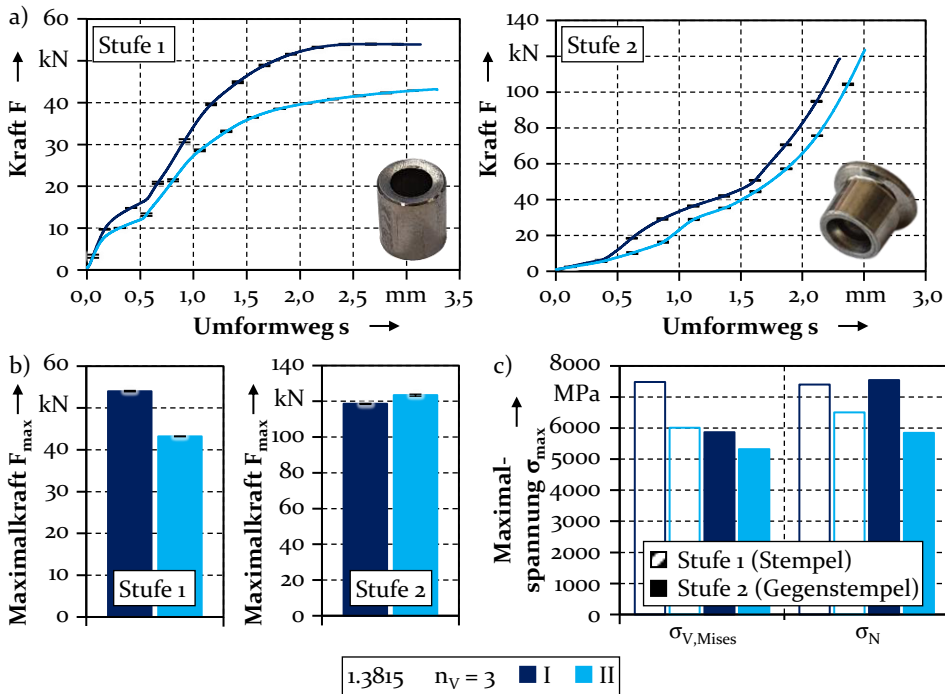


Bild 32: a) Experimentelle Kraft-Weg-Verläufe, b) experimentelle Maximalkräfte und c) numerisch ermittelte Spannungen im Werkzeug bei der Nietherstellung in Abhängigkeit von der Umformtemperatur

Was die erreichten maximalen Prozesskräfte anbelangt, welche Bild 32 b) zu entnehmen sind, liegt in Stufe 1 bei 200 °C eine Maximalkraft von $43,2 \text{ kN} \pm 0,1 \text{ kN}$ im Vergleich zu $54,0 \text{ kN} \pm 0,2 \text{ kN}$ bei Raumtemperatur vor, was einer Kraftreduzierung um etwa 20 % entspricht. Die Ursache hierfür ist die verbesserte Umformbarkeit von 1.3815 bei erhöhter Temperatur. Diese Ursache basiert im Allgemeinen auf der temperaturbedingten Erhöhung der Beweglichkeit der Versetzungen im Werkstoff [69], im Speziellen aber auch auf der Zunahme der Beweglichkeit der interstitiell gelösten Stickstoffatome [100]. Aus diesen Gründen ist in Stufe 2 ebenfalls eine temperaturbedingte Kraftreduzierung feststellbar. Bei der Umformung bei 200 °C liegt das Kraftniveau ab einem Umformweg von etwa 0,5 mm stets unterhalb des entsprechenden Kraftwerts bei Raumtemperatur, wenn dem Vergleich derselbe Umformweg zugrunde gelegt wird. In Bezug auf die erforderliche Maximalkraft hingegen wird bei 200 °C keine Kraftreduzierung

erzielt, was darin begründet ist, dass bei gleichem Stempelweg ein größerer maximaler Umformweg erreicht wird. Ein weiterer Grund hierfür lässt sich aus der numerischen Analyse des Stoffflusses und der Verfestigung ableiten. Demnach ist der Werkstofffluss bei 200 °C durch die erleichterte Versetzungsbewegung begünstigt, was zu einer verbesserten Ausformung des Nietkopfes führt. In der Folge nimmt die Verfestigung im Kopfbereich zu, weshalb am Prozessende im Gegensatz zu bei Raumtemperatur umgeformten Nieten in nahezu allen Bereichen im Kopf lokale Festigkeiten von über 2100 MPa vorliegen. Dies trägt dazu bei, dass die bei Raumtemperatur erreichte Maximalkraft sogar geringfügig überschritten wird.

Aus der numerischen Spannungsanalyse zur Untersuchung der Werkzeugbeanspruchung, deren Ergebnisse in Bild 32 c) für die identifizierten höchstbeanspruchten Werkzeugkomponenten dargestellt sind, geht hervor, dass in Stufe 1 die maximale von-Mises-Vergleichsspannung im Stempel bei 200 °C um etwa 20 % im Vergleich zu 7487 MPa bei Raumtemperatur reduziert ist. Auch die maximal auftretende Kontaktnormalspannung von 7405 MPa wird infolge der Temperaturerhöhung um etwa 12 % verringert. Die Spannungsreduzierung ist dadurch erklärbar, dass gemäß der numerischen Stoffflussanalyse bei erhöhter Temperatur bereits früher gesteigerte Fließgeschwindigkeiten in der Napfwand erreicht werden, was sich auf die erleichterte Versetzungsbewegung zurückführen lässt und wodurch das Fließen des Werkstoffs nach dem Überschreiten des Fließbunds erleichtert ist. Obgleich in Stufe 2 eine vergleichbare Maximalkraft für beide Temperaturen vorliegt, ist die Umformung bei 200 °C aufgrund der verbesserten Umformbarkeit des Nietwerkstoffs ebenfalls mit einer geringeren Werkzeugbeanspruchung verbunden. Die maximal auftretende von-Mises-Vergleichsspannung von 5871 MP, welche bei Raumtemperatur im Gegenstempel vorliegt, ist um etwa 10 % und die maximale Kontaktnormalspannung von 7546 MPa um etwa 20 % verringert, wenn die Umformung bei 200 °C erfolgt. Das Untersuchungsergebnis, dass trotz vergleichbarer Maximalkraft die lokalen maximalen Spannungen im Werkzeug durch die Temperaturerhöhung reduziert werden können, bietet die Möglichkeit zur Erweiterung von Prozessgrenzen beispielsweise hinsichtlich der Ausformung der Niete, welche aufgrund der hohen Spannungen in Kombination mit der maximalen Druckfestigkeit der Werkzeugwerkstoffe limitiert ist.

Einfluss auf die Bauteileigenschaften

Um den Temperatureinfluss auf die resultierenden geometrischen Parameter der Nöpfe und Niete zu untersuchen, werden diese mittels optischer 3D Messung analysiert. Die Ergebnisse sind in Bild 33 zusammengefasst.

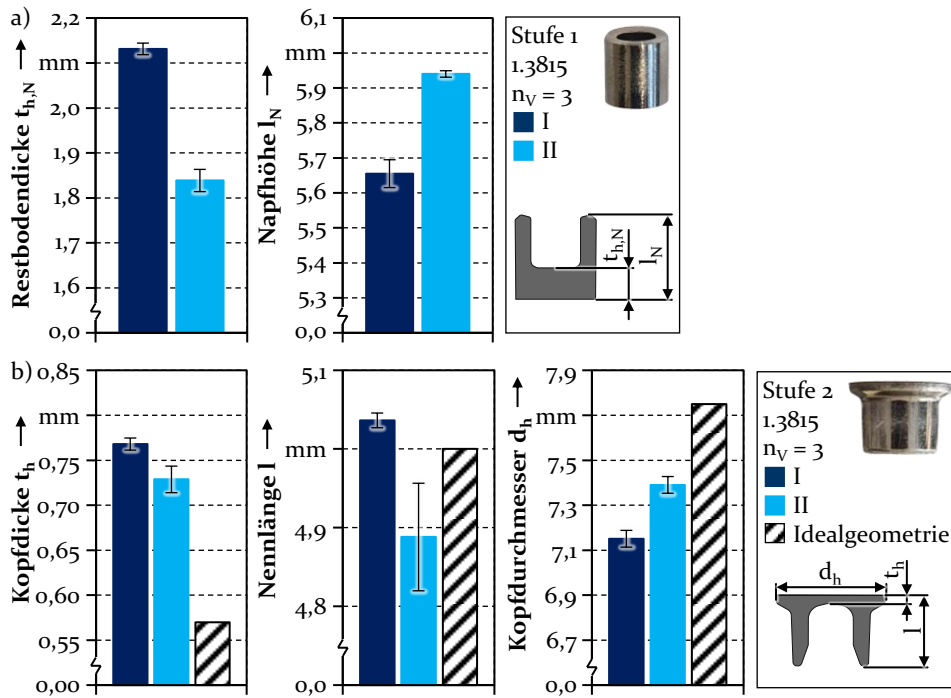


Bild 33: Geometrische Parameter der a) Näpfe nach Stufe 1 und b) Niete nach Stufe 2 in Abhängigkeit von der Umformtemperatur

Die Restbodendicke der Näpfe nach Stufe 1 bei Raumtemperatur beträgt $2,13 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, während die bei 200 °C umgeformten Näpfe eine geringere Restbodendicke von $1,84 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ aufweisen. Da der Innen- und der Außendurchmesser durch den Stempel und die Matrice festgelegt sind, ergeben sich entsprechend Unterschiede in Bezug auf die Napfhöhe von $5,66 \text{ mm} \pm 0,04 \text{ mm}$ (RT) und $5,94 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ (200 °C). Demnach führt die Temperaturerhöhung zu einer Verringerung der Restbodendicke und einer Vergrößerung der Napfhöhe. Die Niete nach Stufe 2 weisen eine Kopfdicke von $0,77 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ (RT) und $0,73 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ (200 °C) auf. Die erreichte Nennlänge beträgt $5,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ (RT) und $4,89 \text{ mm} \pm 0,07 \text{ mm}$ (200 °C). Der Kopfdurchmesser ergibt sich zu $7,15 \text{ mm} \pm 0,04 \text{ mm}$ (RT) und $7,39 \text{ mm} \pm 0,04 \text{ mm}$ (200 °C). Infolge der erhöhten Prozesstemperatur wird demnach eine Vergrößerung des Kopfdurchmessers und tendenziell eine Reduzierung der Kopfdicke und der Nennlänge erreicht. Die auftretenden Unterschiede lassen sich entsprechend den zuvor durchgeführten analytischen Berechnungen zum Temperatureinfluss hauptsächlich der Wärmeausdehnung der Werkzeugaktivteile und der verbesserten Umformbarkeit des Nietwerkstoffs zuordnen.

Der in Abhängigkeit von der Temperatur veränderte Werkstofffluss wirkt sich auf die Ausformung der Bauteile und die erreichten geometrischen Parameter aus und ist daher ein Erklärungsansatz für die temperaturbedingten Änderungen bezüglich der geometrischen Bauteileigenschaften. Aufgrund des begünstigten Werkstoffflusses ist somit erklärbar, dass bei 200 °C ein größerer Kopfdurchmesser erzielt wird.

Die bei 200 °C erreichte Kopfdicke ist zwar im Vergleich zu den bei Raumtemperatur umgeformten Nieten reduziert, aber die Abweichung der Kopfdicke im Vergleich zur für das Fügen definierten Idealgeometrie mit einer Kopfdicke von 0,57 mm beträgt noch immer 0,16 mm im Vergleich zu 0,20 mm bei Raumtemperatur. Es ist zu prüfen, ob diese Abweichung eine negative Auswirkung auf das Fügeergebnis hat, da durch die Kopfdicke und die damit zusammenhängende Bohrungstiefe der Niete der Platz für die Aufnahme des Butzens des stempelseitigen Blechs vorgegeben ist. Es ist besonders wichtig, dass ausreichend Platz für die Materialaufnahme sichergestellt ist, da es ansonsten aufgrund des Innendrucks zum Bruch des matrizenseitigen Blechs kommen kann [124]. Die bei Raumtemperatur erreichte Nennlänge ist um 0,04 mm größer als bei der Idealgeometrie, welche eine Nennlänge von 5,00 mm aufweist. Die Nennlänge nach der Umformung bei 200 °C hingegen ist um 0,11 mm geringer als bei der Idealgeometrie. Dies spielt dahingehend eine Rolle, weil eine zu große Nennlänge die Ursache für ein Versagen des matrizenseitigen Blechs [43] aufgrund einer zu geringen Restbodendicke [59], ein Ausknicken oder eine übermäßige Stauchung des Nietschafts sein kann [60], was wiederum zu einer zu geringen Hinterschnittausbildung und Verbindungsfestigkeit führen kann. Dies kann auch die Folge aufgrund eines erschwerten Aufspreizens bei einer zu geringen Nennlänge sein [43]. Die bestehenden Abweichungen betragen allerdings maximal etwas mehr als 2 %, weshalb der zu erwartende Einfluss der Abweichungen auf das Fügen als gering eingestuft wird. Die Abweichung des Kopfdurchmessers zur Idealgeometrie mit 7,75 mm beträgt nach der Umformung bei 200 °C 0,36 mm, was weniger als 5 % entspricht, während die Abweichung nach der Umformung bei Raumtemperatur beinahe 8 % ist. Insbesondere der Kopfdurchmesser ist für das Fügen von hoher Relevanz, da ein verringerter Durchmesser mit einer reduzierten Verbindungsfestigkeit einhergehen kann.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bei einer Erhöhung der Prozesstemperatur auf 200 °C trotz einer vergleichbaren maximalen Prozesskraft eine verbesserte Ausformung der Niete im Vergleich zu Raumtemperatur erzielt wird. Dieser Effekt ist nicht nur auf die verbesserte Umformbarkeit und den begünstigten Stofffluss, sondern auch auf den größeren

Umformweg, welcher bei gleichem Stempelweg aufgrund der Wärmeausdehnung erreicht wird und sich ebenfalls auf die Kopfdicke auswirkt, zurückzuführen. Zudem ist der Einfluss der unterschiedlichen Restbodendicken der Näpfe nicht auszuschließen. Es gilt daher, diese Ursachen voneinander zu separieren, um den Temperatureinfluss auf die erreichten geometrischen Parameter bewerten zu können. Dies erfolgt im Rahmen der im nächsten Abschnitt dargelegten Untersuchungen zu Temperaturkombinationen. Darüber hinaus muss festgestellt werden, dass zwar eine bessere Ausformung bei 200 °C möglich ist, aber die Idealgeometrie auch unter diesen Bedingungen nicht erreicht werden kann, wenn in Bezug auf die maximal auftretenden Spannungen im Werkzeug das Einhalten des üblicherweise verwendeten Sicherheitsfaktors von 1,5 gewährleistet sein soll.

Neben der Nietgeometrie sind die mechanischen Eigenschaften der umgeformten Niete entscheidend für den Fügeprozess. Die bei der Nietherstellung erreichte Härte der Niete ist in Abhängigkeit von der Umformtemperatur in Bild 34 dargestellt. Um die grundsätzliche Eignung der Niete für das Fügen von hochfestem Stahl auf Basis der mechanischen Eigenschaften zu bewerten, wird die Erfüllung der in Bild 7 zusammengefassten grundlegenden Anforderungen überprüft, was zunächst ausführlich für die bei Raumtemperatur umgeformten Niete erfolgt, ehe der Vergleich mit den bei 200 °C umgeformten Nieten gezogen wird.

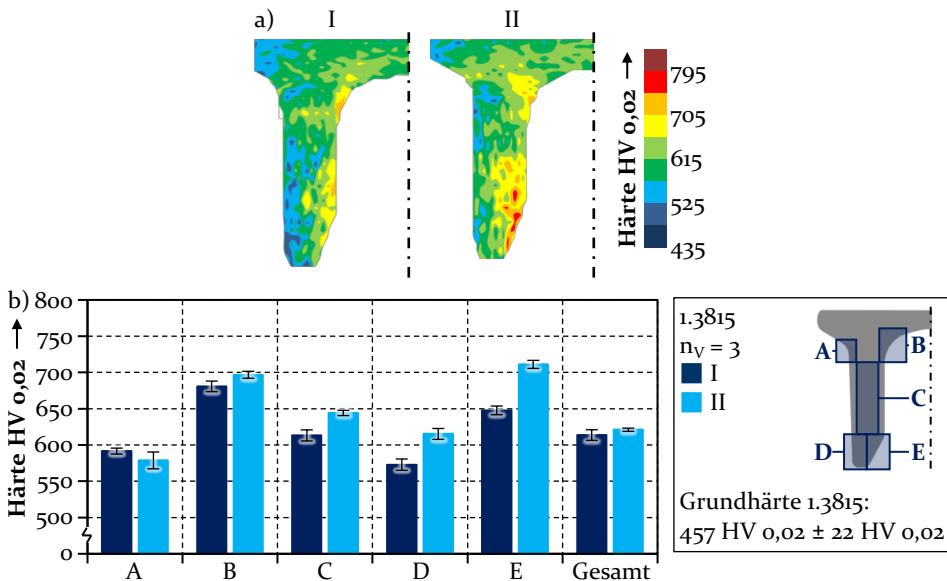


Bild 34: Härte von Nieten aus 1.3815 a) über den Bauteilquerschnitt und b) in ausgewählten Nietbereichen in Abhängigkeit von der Umformtemperatur

Die bei Raumtemperatur umgeformten Niete weisen eine mittlere Härte über den gesamten Bauteilquerschnitt von $614 \text{ HV } 0,02 \pm 7 \text{ HV } 0,02$ auf. Während die experimentell ermittelte Grundhärte nicht umgeformter Drahtabschnitte aus 1.3815 $457 \text{ HV } 0,02 \pm 22 \text{ HV } 0,02$ beträgt, überschreitet das erreichte Härteniveau der Niete aus 1.3815 somit die Härte konventioneller, vergüteter Niete der Härteklasse H4 von 480 HV. Das vergleichsweise hohe Härteniveau der Niete aus druckaufgesticktem Stahl wird dabei ohne eine zusätzliche Wärmebehandlung erzielt und resultiert allein aus der hohen Kaltverfestigung beim Umformen. Merklein et al. [111] stellten beim Vergleich von vergüteten Schraubenrohlingsen aus 20MnB4 und von umgeformten, nicht wärmebehandelten Schraubenrohlingsen aus 1.3815 ebenfalls fest, dass bei den Bauteilen aus 1.3815 die Härte der vergüteten Bauteile auch ohne Wärmebehandlung übertroffen werden kann. Aufgrund der Tatsache, dass auf die Wärmebehandlung der Niete verzichtet wird, ergibt sich im Gegensatz zu den homogenen Eigenschaften vergüteter Niete eine Gradierung der Härte, welche sich in unterschiedlichen lokalen Härtewerten in den ausgewählten Bereichen A bis E widerspiegelt. Die bei Raumtemperatur umgeformten Niete sind im äußeren Übergangsbereich vom Nietschaft zum Nietkopf durch eine lokale Härte von $592 \text{ HV } 0,02 \pm 4 \text{ HV } 0,02$ (A) gekennzeichnet. In diesem Übergangsbereich besteht ein hohes Risiko der Rissbildung aufgrund von Spannungs- und Dehnungsspitzen beim Stempelrückhub beim Fügen [25]. Vor diesem Hintergrund wird die vergleichsweise geringe Härte in diesem Bereich in Kombination mit der hohen Duktilität von 1.3815 als vorteilhaft für das Fügen eingestuft. Im inneren Übergangsbereich des Nietschafts und im Nietschaft selbst liegen mittlere Härtewerte von $681 \text{ HV } 0,02 \pm 7 \text{ HV } 0,02$ (B) und $613 \text{ HV } 0,02 \pm 8 \text{ HV } 0,02$ (C) vor. Dass im Bereich B eine vergleichsweise hohe Härte auftritt, ist auf den Napf-Rückwärts-Fließpressprozess in Stufe 1 zurückzuführen. Im Übergangsbereich vom Napfboden zur Napfwand werden typischerweise Maximalwerte der lokalen Vergleichsformänderungen erreicht [119]. Im Hinblick auf den Fügevorgang sind die hohen lokalen Härtewerte in den Bereichen B und C als positiv zu bewerten. Van Hall et al. [67] untersuchten Fügeverbindungen mit USIBOR 1500 und stellten bei Nieten mit einer Härte von weniger als 550 HV ein Ausknicken des Nietschafts fest. Da die Niete aus 1.3815 im Schaftbereich eine Härte von mehr als $600 \text{ HV } 0,02$ aufweisen, können das Ausknicken und die übermäßige Stauchung des Nietschafts, welche ebenso als typischer Fehler beim Fügen von hochfestem Stahl bekannt ist [13] und im schlechtesten Fall dazu führt, dass das stempelseitige Blech überhaupt nicht durchtrennt wird, verhindert werden. Im Bereich des Nietfußes weisen die Niete lokale Härtewerte von $573 \text{ HV } 0,02 \pm 8 \text{ HV } 0,02$ (D) und $648 \text{ HV } 0,02 \pm 6 \text{ HV } 0,02$ (E)

auf. Durch die Kombination aus einer geringeren Härte im Bereich D und einer höheren Härte im Bereich E wird das Aufspreizen und damit die Hinterschnittausbildung gefördert. Dies ist beim Fügen von hochfestem Stahl auf der Matrizen­seite maßgeblich, da das Aufspreizen erschwert ist [41] und aufgrund dessen die Hinterschnittausbildung unzureichend sein kann [24], was dazu führen kann, dass die Verbindungs­festigkeit verringert ist oder sogar keine qualitäts­gerechte Verbindung herstellbar ist. Durch die hohe Härte im Bereich E kann außerdem sichergestellt werden, dass die Nietschneide intakt bleibt. Dies ist nicht nur für das Durchschneiden des oberen Blechs, sondern auch für den Spreizvorgang relevant [147].

Die bei 200 °C umgeformten Niete verfügen über ein Gesamthärteniveau von 621 HV 0,02 ± 2 HV 0,02, welches mit dem Härteniveau der bei Raumtemperatur umgeformten Niete vergleichbar ist. Es ergeben sich allerdings Unterschiede in Bezug auf die lokale Härte in den ausgewählten Bereichen, wobei die Veränderungen maßgeblich in den Bereichen C bis E auftreten. Im Vergleich zu den bei Raumtemperatur umgeformten Nieten ist die Härte im Bereich A um 2 % geringer, während die Härte im Bereich B um 2 % höher ist. In den restlichen Bereichen ist die Härte hingegen um 5 % (C), 7 % (D) und 10 % (E) erhöht. Die temperaturinduzierte erhöhte Diffusion des interstitiell gelösten Stickstoffs [100] in Verbindung mit der gemeinsamen Bewegung der Stickstoffatome und Versetzungen durch ein Anheften des Stickstoffs [101] stellt einen Erklärungsansatz für diese Veränderungen der lokalen Härte dar. Der bei 200 °C im Vergleich zu Raumtemperatur erhöhte Verfestigungsexponent des hochstickstofflegierten Stahls 1.3815 unterstreicht dies. Da entsprechend der numerischen Stoffflussanalyse zu Beginn des Umformprozesses vor allem im Nietfuß erhöhte Fließgeschwindigkeiten vorliegen, findet in diesem Bereich eine zunehmende Verfestigung statt. Die Steigerung der Härte im Nietschaft und im Nietfuß wird als vorteilhaft für das Fügen bewertet, da das Risiko des Ausknickens des Nietschafts, der übermäßigen Stauchung und der Beschädigung der Nietschneide hierdurch noch weiter verringert wird. Die Veränderungen der Härte in den Übergangsbereichen vom Nietschaft zum Nietkopf werden als geringfügig eingestuft.

Gemäß der Analyse sind die in Bild 7 dargestellten grundlegenden Anforderungen an die Niete bezüglich der mechanischen Eigenschaften nach der Umformung sowohl bei Raumtemperatur als auch bei 200 °C erfüllt. Es ist daher davon auszugehen, dass im Hinblick auf die Nieteigenschaften die grundsätzliche Eignung der Niete für das Fügen von unterschiedlichen Materialkombinationen aus dem hochfesten Stahl HCT780X und der Aluminiumlegierung EN AW-5083 entsprechend der festgelegten Fügeaufgabe

gegeben ist. Dies ist anhand der Überprüfung des Einsatzverhaltens der Niete zu verifizieren, worauf in Kapitel 7 eingegangen wird. Des Weiteren ist zu klären, ob die Veränderung der lokalen Niethärte durch den Temperatureinfluss verursacht wird oder auf die bereits erläuterten Unterschiede hinsichtlich der erreichten Nietgeometrie zurückzuführen sind. Um den Temperatureinfluss auf die Gradierung der Eigenschaften hiervon abgegrenzt zu bewerten, werden im nachfolgenden Abschnitt Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Temperaturkombinationen unter Einhaltung einer gleichbleibenden Kopfdicke analysiert.

6.3.2 Umformtemperatur und Temperaturkombinationen bei vergleichbarer Bauteilgeometrie

Da das Erreichen unterschiedlicher Werte für die Kopfdicke der Niete Auswirkungen beispielsweise auf die Bauteilhärte haben kann, lassen sich Veränderungen der mechanischen Nieteigenschaften anhand der im vorhergehenden Abschnitt vorgestellten Untersuchungen nicht ausschließlich auf den direkten Temperatureinfluss zurückführen. Indem durch die Anpassung des Stempelwegs mithilfe der im Rahmen der grundlegenden Untersuchungen zum Temperatureinfluss dargelegten analytischen Berechnungen sichergestellt wird, dass eine vergleichbare Restbodendicke und Kopfdicke erzielt wird, können diese Einflüsse und Effekte voneinander abgegrenzt werden. Daher ist das Erreichen einer vergleichbaren Restbodendicke nach Stufe 1 und Kopfdicke nach Stufe 2 die Voraussetzung für die in nachfolgender Tabelle 10 gezeigten Variantenuntersuchungen zur Herstellung von Nieten aus dem hochstickstofflegierten Stahl 1.3815. Auf diese Weise wird der Temperatureinfluss auf die erreichte Nietgeometrie in Bezug auf die Kopfdicke eliminiert.

Tabelle 10: Untersuchte Varianten für die Analyse des Einflusses unterschiedlicher Temperaturkombinationen bei vergleichbarer Bauteilgeometrie

Variante	Variation (Variierter Parameter: T)		Kriterium Vergleichbarkeit (Konstanter Parameter)	
	S 1	S 2	S 1	S 2
I	RT	RT	t _{h,N}	t _h
II	200 °C			
III	200 °C	200 °C		
IV	RT			

Darüber hinaus wurde in den bislang dargestellten Untersuchungen zum Temperatureinfluss die Temperatur für beide Umformstufen konstant ge-

halten. Um ein umfassendes Verständnis für den Temperatureinfluss insbesondere bei der mehrstufigen Umformung zu erlangen, wird untersucht, inwiefern die Temperatur in Stufe 1 die Umformung in Stufe 2 sowie das finale Umformergebnis beeinflusst. Hierfür wird die Umformtemperatur selektiv variiert, wie ebenfalls Tabelle 10 zu entnehmen ist.

Einfluss auf den Umformprozess

Durch die selektive Variation der Temperatur werden Veränderungen bezüglich des Werkstoffflusses und der Verfestigung in Stufe 2 hervorgerufen, wie es in nachfolgendem Bild 35 für die untersuchten Varianten dargestellt ist.

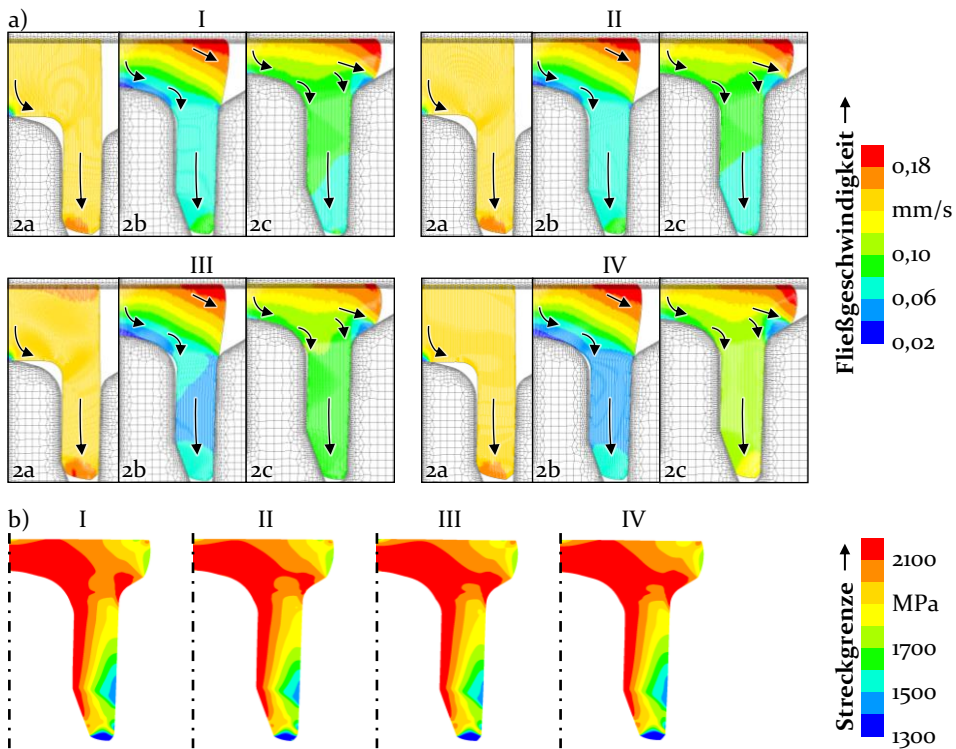


Bild 35: Werkstofffluss und Verfestigung in Abhängigkeit von der gewählten Temperaturkombination: a) Stofffluss in Stufe 2 und b) Streckgrenze am Ende von Stufe 2

Durch die Anpassung des Stempelwegs weisen die Näpfe nach Stufe 1 eine vergleichbare Geometrie auf. Daher sind beim Aufsetzen des Napfbodens auf den Gegenstempel (2a) in Stufe 2 keine Unterschiede in Bezug auf den Stofffluss in den unteren Bereich der Kavität der Matrize zu identifizieren. Beim Beginn der Ausformung des Nietkopfes (2b) zeigen sich Unterschiede zwischen den in Stufe 2 bei Raumtemperatur und bei 200 °C umgeformten

Varianten. Bei den Varianten III und IV ist der Stofffluss im Nietschaft im Vergleich zur Variante I und Variante II verlangsamt. Diese Veränderung ist temperaturbedingt, da in diesem Fall der Einfluss der Napfhöhe ausgeschlossen werden kann. Diese Annahme ist zusätzlich dadurch abgesichert, dass dieser Effekt bei den beiden Varianten III und IV auftritt, wobei für erstere bei 200 °C umgeformte Näpfe und für letztere bei Raumtemperatur hergestellte Näpfe verwendet werden. Dies bestätigt außerdem, dass die Ursache dafür, dass der Stofffluss bei der in Bild 31 dargestellten Variante II zum Erliegen kommt, ein Zusammenspiel aus der größeren Napfhöhe und der temperaturbedingten Veränderung des Stoffflusses ist. Als Folge des verlangsamten Stoffflusses im Nietschaft ist von einer begünstigten Ausformung des Nietkopfes bei erhöhter Temperatur auszugehen. Der Stofffluss im Nietschaft nimmt zum Prozessende (2c) für alle Varianten zu. Bei 200 °C sind hierbei größere Bereiche mit erhöhter Geschwindigkeit erkennbar. Bei der Variante IV ist die Geschwindigkeit des Stoffflusses im Nietschaft am Prozessende im Vergleich zur Variante III erhöht. Dies kann aus einer geringeren Vorverfestigung des bei Raumtemperatur umgeformten Napfes nach Stufe 1 in Kombination mit der verbesserten Umformbarkeit bei 200 °C in Stufe 2 resultieren. Infolge der begünstigten Ausformung des Nietkopfes bei 200 °C werden für die Varianten III und IV vor allem im Bereich des Nietkopfes größere Bereiche mit Festigkeitswerten von über 2100 MPa erreicht.

Da ein Einfluss der Wahl der Temperaturkombination in den beiden Umformstufen auf den Werkstofffluss und die Verfestigung vorliegt, ist es naheliegend, dass auch die Prozesskräfte und die auftretenden Spannungen im Werkzeug hiervon beeinflusst werden. Die experimentellen Kraft-Weg-Verläufe bei selektiver Variation der Umformtemperatur sind in Bild 36 a) gegenübergestellt. Da entsprechend dem vorgegebenen Kriterium der Vergleichbarkeit unabhängig von der Umformtemperatur eine vergleichbare Restbodendicke nach Stufe 1 erzielt wird, treten in Stufe 2 kaum Unterschiede bezüglich des ersten charakteristischen Kraftanstiegs beim Aufsetzen des Napfbodens auf der Spitze des Gegenstempels (vergleiche 2a in Bild 20) auf. Ein Unterschied ergibt sich in Bezug auf den Beginn der Ausformung des Nietkopfs (vergleiche 2b in Bild 20). Dieser tritt für die beiden Varianten III und IV früher ein als für die Varianten bei Raumtemperatur in Stufe 2. Die Ursache hierfür ist der zuvor beschriebene veränderte Werkstofffluss bei 200 °C, da die Verlangsamung des Stoffflusses im Nietschaft die Ausformung des Nietkopfes begünstigt. Auch das Prozessende (vergleiche 2c in Bild 20) wird für die beiden Varianten III und IV früher erreicht,

da ein geringerer Umformweg als bei Raumtemperatur erforderlich ist, um eine vergleichbare Kopfdicke der Niete zu erzielen.

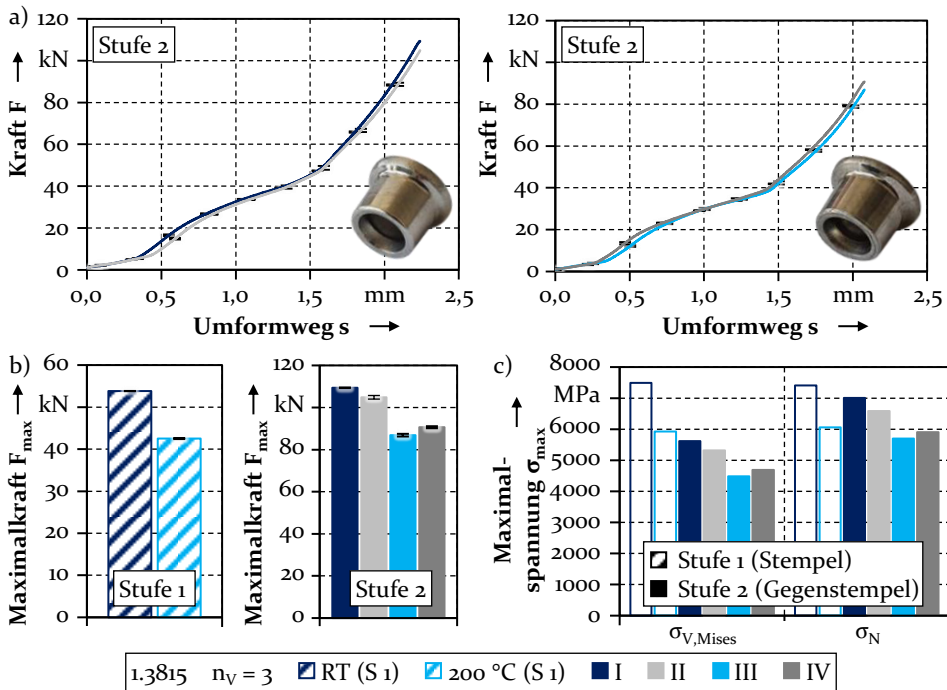


Bild 36: a) Experimentelle Kraft-Weg-Verläufe, b) experimentelle Maximalkräfte und c) numerisch ermittelte Spannungen im Werkzeug bei der Nietherstellung in Abhängigkeit von der gewählten Temperaturkombination

Aus der Analyse der in Bild 36 b) dargestellten Maximalkräfte geht hervor, dass nicht nur die Umformtemperatur im Allgemeinen, sondern auch die gewählte Temperaturkombination die erforderliche Prozesskraft beeinflusst. Während für die Variante I eine Maximalkraft von $109,4 \text{ kN} \pm 0,3 \text{ kN}$ erreicht wird, ist die Maximalkraft bei Variante II um etwa 4 % im Vergleich hierzu verringert. Dies beweist, dass die in Stufe 1 gewählte Prozess-temperatur den Umformprozess in Stufe 2 beeinflusst. Allerdings hat die Temperatur in Stufe 2 einen größeren Einfluss, was anhand der Kraftreduzierung um etwa 21 % für Variante III und etwa 17 % für Variante IV im Vergleich zu Variante I deutlich wird. Somit zeigt sich, dass die im Rahmen der zweistufigen Stauchversuche erlangten Erkenntnisse in Bezug auf die Veränderung der Fließspannung (vergleiche Bild 11) und der Fließgrenze (vergleiche Tabelle 4) in Abhängigkeit von der Temperaturkombination auf die Maximalkräfte bei der Nietherstellung übertragbar sind. Bei den Varianten III und IV führt die thermisch aktivierte, erhöhte Versetzungsbewegung

[69] und die dadurch bedingte Abnahme der Fließspannung bei erhöhter Temperatur [150] zu einer Begünstigung des Werkstoffflusses und letztendlich zu einer Reduzierung der Maximalkraft in Stufe 2. Die auftretenden Unterschiede zwischen den Varianten, für welche dieselbe Umformtemperatur in Stufe 2 genutzt wurde, lassen sich auf ein Zusammenspiel aus verschiedenen potentiellen Ursachen zurückführen. Da für die Umformung in Stufe 2 jeweils Näpfe, welche bei unterschiedlichen Temperaturen hergestellt sind, verwendet werden, stellt die Vorverfestigung der Bauteile einen Einflussfaktor für die Umformung in Stufe 2 dar. Bei 200 °C ist die Beweglichkeit der Stickstoffatome erhöht [100], was zu einer verbesserten Umformbarkeit beiträgt. Allerdings kann hiermit bereits ab 200 °C ein Anheften von Stickstoffatomen an Versetzungen einhergehen [101], was wiederum der temperaturbedingten erleichterten Versetzungsbewegung und damit der verbesserten Umformbarkeit entgegenwirkt. Dies führt zu Unterschieden bezüglich des lokalen Stickstoffgehalts, wodurch folglich nicht nur Unterschiede in Bezug auf die Vorverfestigung nach Stufe 1 hervorgerufen werden, sondern wodurch auch das Verfestigungsverhalten während der Umformung in Stufe 2 beeinflusst wird.

Wie bei den Prozesskräften lässt sich auch bei der Werkzeugbeanspruchung eine Abhängigkeit von der gewählten Temperaturkombination feststellen, wie Bild 36 c) zu entnehmen ist. Es sind vergleichbare Effekte identifizierbar. In Stufe 2 liegen bei der Variante I Maximalwerte der von-Mises-Vergleichsspannung von 5619 MPa und der Kontaktnormalspannung von 7009 MPa vor. Bei der Variante IV hingegen sind diese um etwa 5 % ($\sigma_{V,Mises}$) und 6 % (σ_N) reduziert. Analog zu den Prozesskräften ist bei der Werkzeugbeanspruchung ebenfalls ein größerer Einfluss der Temperatur in Stufe 2 als in Stufe 1 zu verzeichnen. Im Vergleich zur Variante I sind die maximal auftretenden Spannungen bei Variante III um etwa 20 % ($\sigma_{V,Mises}$) und 19 % (σ_N) sowie bei Variante IV um etwa 17 % ($\sigma_{V,Mises}$) und 16 % (σ_N) geringer. Der Effekt der Reduzierung der Werkzeugbeanspruchung bei 200 °C in Stufe 2 lässt sich mit der verbesserten Umformbarkeit, wodurch ein geringerer Umformweg für das Erreichen einer vergleichbaren Kopfdicke wie bei Raumtemperatur erforderlich ist, begründen. Hierzu trägt maßgeblich der erleichterte Werkstofffluss infolge der zunehmenden Versetzungsbewegung bei erhöhter Temperatur bei.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Wahl der Temperaturkombination bei der Nietherstellung den Werkstofffluss, die Prozesskräfte sowie die auftretenden Spannungen im Werkzeug beeinflusst. Da der Einfluss der Geometrie der für Stufe 2 verwendeten Näpfe auszuschließen ist, sind

die Effekte dem Temperatureinfluss zuzuschreiben. Des Weiteren ist festzustellen, dass die Temperatur in Stufe 2 einen größeren Einfluss als die für Stufe 1 gewählte Temperatur hat. Eine Reduzierung der erforderlichen maximalen Prozesskraft ist beispielsweise bereits möglich, wenn nur eine der beiden Stufen bei 200 °C statt bei Raumtemperatur durchgeführt wird, wobei die Temperatur in Stufe 2 entscheidend ist. Bei der Variante IV wird eine Maximalkraft erreicht, welche zwar um 4 % höher als bei der Variante III ist, aber um 17 % geringer als bei der Variante I. Vergleichbare Zusammenhänge sind auch für die Werkzeugbeanspruchung erkennbar, was insbesondere die Variante IV im Hinblick auf eine Kosten-Nutzen-Rechnung bezüglich Energieaufwand und Kraft- sowie Spannungsreduzierung interessant macht.

Einfluss auf die Bauteileigenschaften

Bei den im vorhergehenden Abschnitt beschriebenen Untersuchungen zum Temperatureinfluss ist eine Separierung der verbesserten Umformbarkeit, des größeren Umformwegs infolge der Wärmeausdehnung und der geringeren Restbodendicke der verwendeten Näpfe bei 200 °C als Einflussfaktoren auf die erreichte Bauteilgeometrie nicht möglich. Im Fall der vorliegenden Untersuchungen zur Nutzung unterschiedlicher Temperaturkombinationen hingegen ist das Erreichen einer vergleichbaren Restbodendicke in Stufe 1 und Kopfdicke in Stufe 2 als Kriterium der Vergleichbarkeit definiert. Die geometrischen Parameter sind für die verschiedenen Temperaturkombinationen in Bild 37 gezeigt. Die Abweichungen der Restbodendicke in Stufe 1 liegen bei etwa 0,01 mm. Bei der Kopfdicke beträgt die maximale Abweichung der Varianten von der bei der Variante I erreichten Kopfdicke weniger als 0,02 mm. Somit werden die Voraussetzungen für die Vergleichbarkeit als erfüllt angesehen. Für das Erreichen dieser vergleichbaren geometrischen Parameter ist bei 200 °C ein geringerer Umformweg als bei Raumtemperatur ausreichend. Unterschiede in Bezug auf die restlichen geometrischen Parameter können dementsprechend direkt der verbesserten Umformbarkeit zugeordnet werden. Trotz der vergleichbaren Restbodendicke wird bei 200 °C eine größere Napfhöhe von $5,72 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ im Vergleich zu $5,65 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ bei Raumtemperatur erreicht. Dies lässt sich aufgrund des erhöhten Stoffflusses entgegen der Stempelrichtung bei 200 °C erklären. Bei der Nietgeometrie ergeben sich Unterschiede in Bezug auf den erreichten Kopfdurchmesser, welcher $6,93 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ für Variante I, $6,92 \text{ mm} \pm 0,04 \text{ mm}$ für Variante II, $7,04 \text{ mm} \pm 0,04 \text{ mm}$ für Variante III und $7,03 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ für Variante IV beträgt.

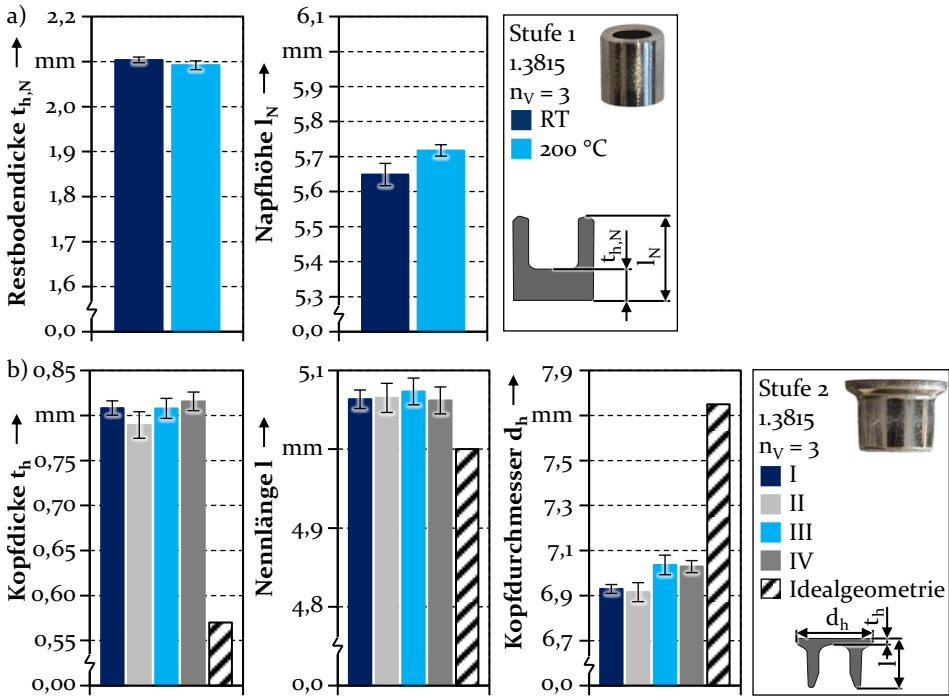


Bild 37: Geometrische Parameter der a) Näpfe nach Stufe 1 und b) Niete nach Stufe 2 in Abhängigkeit von der gewählten Temperaturkombination

Wie bereits bei der Analyse der Prozesskräfte und der Spannungen im Werkzeug zeigt sich anhand dessen, dass die Temperatur in Stufe 2 eine größere Rolle spielt als in Stufe 1. Demnach wird bei der Temperaturerhöhung auf 200 °C in Stufe 2 trotz vergleichbarer Kopfdicke ein größerer Kopfdurchmesser erzielt, was auf die verbesserte Umformbarkeit zurückgeführt werden kann. Dies steht auch im Zusammenhang mit der temperaturbedingten Veränderung des Stoffflusses (vergleiche Bild 35), aus welcher sich eine begünstigte Ausformung des Nietkopfes schließen lässt. Im Hinblick auf die für das Fügen festgelegte Idealgeometrie und die Steigerung der Verbindungsfestigkeit ist das Erreichen eines größeren Kopfdurchmessers von Vorteil.

Aufgrund der Unterschiede in Bezug auf den Kopfdurchmesser wird davon ausgegangen, dass ein hierdurch bedingter Einfluss auf die resultierenden mechanischen Bauteileigenschaften höchstens im Kopfbereich auftreten kann. Abgesehen hiervon sind die geometrischen Unterschiede als Einflussgrößen auszuschließen. Die sich für die untersuchten Temperaturkombinationen ergebenden Härtewerte sind in Bild 38 gegenübergestellt.

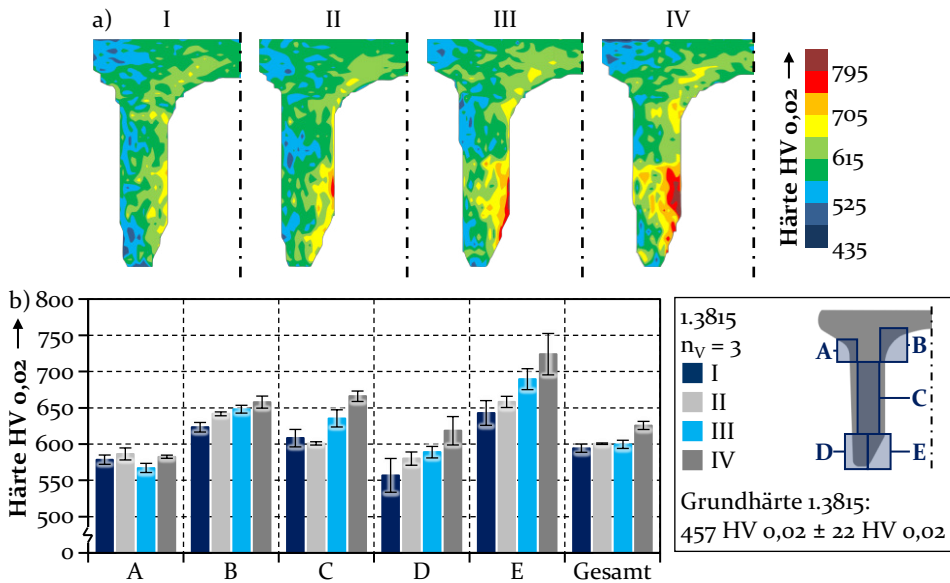


Bild 38: Härte von Nieten aus 1.3815 a) über den Bauteilquerschnitt und b) in ausgewählten Nietbereichen in Abhängigkeit von der gewählten Temperaturkombination

Für alle Varianten ist ein Gesamthärtenniveau oberhalb des definierten unteren Grenzwerts von 480 HV zu verzeichnen. Die Gesamthärte der Niete der Variante I beträgt $594 \text{ HV } 0,02 \pm 6 \text{ HV } 0,02$. Bei den Varianten II und III liegt mit einer Abweichung von lediglich 1 % ein vergleichbares Gesamthärtenniveau vor. Niete der Variante IV hingegen weisen ein um mehr als 5 % erhöhtes Härteniveau auf. Hierzu tragen hauptsächlich die erhöhten lokalen Härtewerte im Bereich des Niefschafts und des Niefußes bei, wodurch ausgeschlossen werden kann, dass das Erreichen eines größeren Kopfdurchmessers die Ursache für das höhere Härteniveau ist. Vielmehr ist davon auszugehen, dass ein Zusammenspiel aus der unterschiedlichen Vorverfestigung, der temperaturabhängigen Stickstoffdiffusion [100] und dem Anheften von Stickstoff an die Versetzungen [101] zu dem höheren Härteniveau führt. Dies hat auch Auswirkungen auf die lokalen Härtewerte. Die Härte im Bereich B ist verglichen mit $623 \text{ HV } 0,02 \pm 7 \text{ HV } 0,02$ für Variante I bei den restlichen Varianten um 3 % (II), 4 % (III) und 6 % (IV) erhöht. Im Bereich C wird für die Variante I eine Härte von $608 \text{ HV } 0,02 \pm 12 \text{ HV } 0,02$ ermittelt. Während für Variante II keine wesentliche Veränderung auftritt, wird für die Varianten, welche in Stufe 2 bei 200 °C umgeformt werden, eine Steigerung der Härte um 5 % (III) und 10 % (IV) erreicht. Im Hinblick auf die Vermeidung typischer Fehler beim

Fügen von hochfestem Stahl, wie die übermäßige Stauchung oder das Ausknicken des Nietschafts [26], wird die infolge der Temperaturerhöhung in Stufe 2 erzielte Steigerung der Härte in den Bereichen B und C als vorteilhaft bewertet. Im Nietfuß weisen Nieten der Variante I eine Härte von $557 \text{ HV } 0,02 \pm 23 \text{ HV } 0,02$ im Bereich D und $643 \text{ HV } 0,02 \pm 17 \text{ HV } 0,02$ im Bereich E auf. Im Vergleich hierzu ist bei den restlichen Varianten die Härte im Bereich D um 4 % (II), 6 % (III) und 11 % (IV), im Bereich E um 2 % (II), 7 % (III) und 13 % (IV) erhöht. Die Erhöhung der Härte im Bereich E bei den in Stufe 2 bei 200°C umgeformten Nieten ist hinsichtlich der Sicherstellung der Intaktheit der Nietschneide während des Fügevorgangs als positiv einzustufen.

Zusammenfassend sind die vorab definierten Grundanforderungen (vergleiche Bild 7) für alle Varianten erfüllt. Auf Basis der Härteanalyse ist festzuhalten, dass die Wahl der Temperaturkombination die lokale Härte der Nieten beeinflusst. Aufgrund der zuvor nachgewiesenen Vergleichbarkeit der erreichten Geometrie der Nieten abgesehen vom Kopfdurchmesser lassen sich die Änderungen der lokalen Härte im Nietschaft und Nietfuß direkt dem Einfluss der Umformtemperatur zuordnen. Wie bereits im Rahmen der vorhergehenden Untersuchungen festgestellt, spielt vornehmlich die Temperatur in Stufe 2 eine Rolle. Durch die Erhöhung der Umformtemperatur in Stufe 2 auf 200°C ist eine Steigerung der Härte im Nietschaft und Nietfuß um bis zu 13 % erzielbar, was als vorteilhaft für den Fügeprozess bewertet wird.

6.3.3 Restbodendicke der Näpfe nach Stufe 1

Aus dem Vergleich der Untersuchungsergebnisse zum Einfluss der Umformtemperatur und der Temperaturkombinationen geht hervor, dass neben der Temperatur auch die Restbodendicke der umgeformten Näpfe nach Stufe 1 Auswirkungen beispielsweise auf den Stofffluss in Stufe 2 hat. Dies basiert auf der Gegenüberstellung der Stoffflussanalyse für die Umformung bei 200°C in Stufe 2, für welche Näpfe eingesetzt werden, welche unterschiedliche Restbodendicken nach der Umformung in Stufe 1 bei 200°C aufweisen. Demnach führt der Einsatz von Näpfen mit geringerer Restbodendicke und entsprechend größerer Napfhöhe dazu, dass bei 200°C der Stofffluss im Nietschaft in Stufe 2 weitgehend zum Erliegen kommt (vergleiche Bild 31, Variante II). Werden im Vergleich hierzu Näpfe mit größerer Restbodendicke und geringerer Napfhöhe unter ansonsten vergleichbaren Prozessbedingungen eingesetzt, ist der Stofffluss in Stufe 2

im Nietschaft zwar verlangsamt, kommt aber nicht zum Erliegen (vergleiche Bild 35, Variante III). Um den Einfluss der Restbodendicke auf die Umformung und die Bauteileigenschaften unabhängig von der gewählten Umformtemperatur zu untersuchen, werden in Stufe 1 bei Raumtemperatur Näpfe aus dem hochstickstofflegierten Stahl 1.3815 mit unterschiedlichen Restbodendicken umgeformt, wie in Tabelle 11 dargestellt.

Tabelle 11: Untersuchte Varianten für die Analyse des Einflusses der Restbodendicke der Näpfe nach Stufe 1

Variante	Variation (Variierte Parameter: s_s , $t_{h,N}$)		Kriterium Vergleichbarkeit (Konstanter Parameter)	
	S 1	S 2	S 1	S 2
I	s_s	$t_{h,N}$ nach S 1 = 2,1 mm	-	s_s
II		$t_{h,N}$ nach S 1 = 1,9 mm		
III		$t_{h,N}$ nach S 1 = 1,7 mm		

Für das Erreichen der unterschiedlichen Restbodendicken der Näpfe wird der Stempelweg in Stufe 1 entsprechend variiert. Die verschiedenen Näpfe werden anschließend für die Umformung von Nieten in Stufe 2 verwendet, wobei als Kriterium der Vergleichbarkeit derselbe Stempelweg für alle Varianten gewählt wird. Dies ermöglicht es, zu analysieren, ob die Restbodendicke einen Einfluss auf die erreichbare Nietgeometrie auch bezüglich der Kopfdicke hat, was wiederum bei der Evaluierung des Einflusses auf die resultierenden mechanischen Eigenschaften berücksichtigt werden muss.

Einfluss auf den Umformprozess

Der Einsatz von Näpfen mit unterschiedlichen Restbodendicken für die zweite Umformstufe resultiert in Veränderungen des Werkstoffflusses und der Verfestigung in Stufe 2. Die Ergebnisse der numerischen Analyse des Stoffflusses und der Verfestigung sind für die drei Varianten in Bild 39 gegenübergestellt. Mit abnehmender Restbodendicke der Näpfe ist beim ersten Kontakt des Napfbodens mit dem Gegenstempel (2a) ein zunehmender Werkstofffluss in Richtung der unteren Kavität der Matrize festzustellen. Dies liegt in der unterschiedlichen Napfhöhe begründet, wobei der Beginn der Ausformung der Nietschneide mit abnehmender Restbodendicke und damit zunehmender Napfhöhe früher einsetzt. Wenn die Ausformung des Nietkopfes beginnt (2b), findet bei den Varianten II und III im Gegensatz zur Variante I kein Stofffluss im Nietschaft in den unteren Bereich der Matrize mehr statt. Dieser Effekt ist prinzipiell vergleichbar mit dem in Bild 31 dargestellten Ergebnis für die Nietherstellung bei 200 °C, bei welcher der eingesetzte Napf ebenfalls eine größere Napfhöhe aufweist als bei der Re-

ferenz bei Raumtemperatur. Hierdurch würde die Ausformung des Nietkopfes begünstigt werden. Es besteht allerdings die Vermutung, dass die verringerte Umformbarkeit von 1.3815 bei Raumtemperatur diesem Effekt entgegenwirkt. Zusätzlich wird angenommen, dass der in Richtung des Gegenstempels gerichtete Stofffluss am inneren Übergangsbereich vom Nieten zum Nietkopf bei den beiden Varianten II und III in Kombination mit der verringerten Umformbarkeit bei Raumtemperatur eine Zunahme der Spannungen im Werkzeug bewirkt.

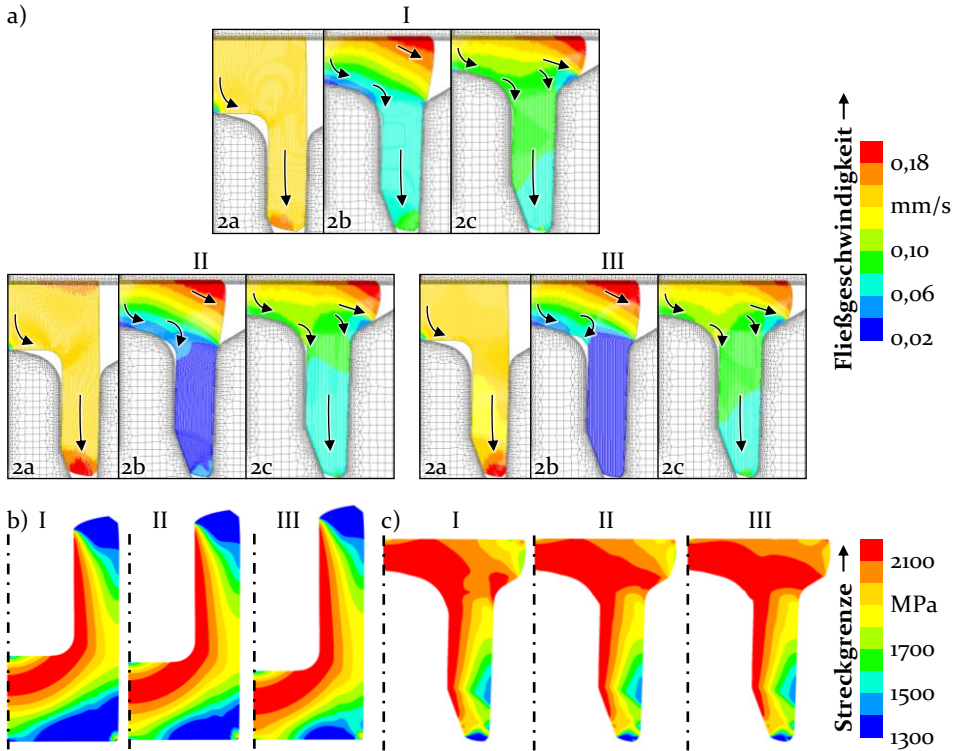


Bild 39: Werkstofffluss und Verfestigung in Abhängigkeit von der Restbodendicke nach Stufe 1: a) Stofffluss in Stufe 2 sowie Streckgrenze am Ende von b) Stufe 1 und c) Stufe 2

Am Prozessende (2c) treten für die drei Varianten einzeln Unterschiede auf. Der Stofffluss im Nieten ist für die Varianten I und III im Vergleich zur Variante II tendenziell erhöht. Es fällt außerdem auf, dass bei der Variante III im äußeren Bereich des Nietkopfes ein verringerter Stofffluss vorliegt. Dies kann zu einer eingeschränkten Ausformung des Nietkopfes beitragen und ist bei der Analyse der erreichten geometrischen Parameter der Niete einzubeziehen. Mit abnehmender Restbodendicke der Näpfe ergibt sich eine höhere Vorverfestigung im Bauteil, weshalb die Näpfe der Vari-

anten II und III durch größere Bereiche mit höherer Festigkeit im Napfboden und in der Napfwand gekennzeichnet sind als Näpfe der Variante I. Wenn Näpfe mit geringerer Restbodendicke und entsprechend höherer Vorverfestigung für die Umformung der Nieten in Stufe 2 eingesetzt werden, trägt dies dazu bei, dass eine höhere Verfestigung im Bereich des Nietkopfes erfolgt. Somit treten für die Varianten II und III größere Bereiche mit höherer Festigkeit im Nietkopf als für Variante I auf, obgleich die Ausformung des Nietkopfes im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Varianten für die Umformung bei 200 °C aufgrund der verringerten Umformbarkeit nicht begünstigt ist.

In den durch die unterschiedlichen Restbodendicken hervorgerufenen Veränderungen des Werkstoffflusses und der Verfestigung in Stufe 2 kann dementsprechend eine Ursache für potentielle Unterschiede der Kraft-Weg-Verläufe liegen. Die experimentellen Kraft-Weg-Verläufe in Abhängigkeit von den unterschiedlichen Restbodendicken der Näpfe sind in Bild 40 a) dargestellt.

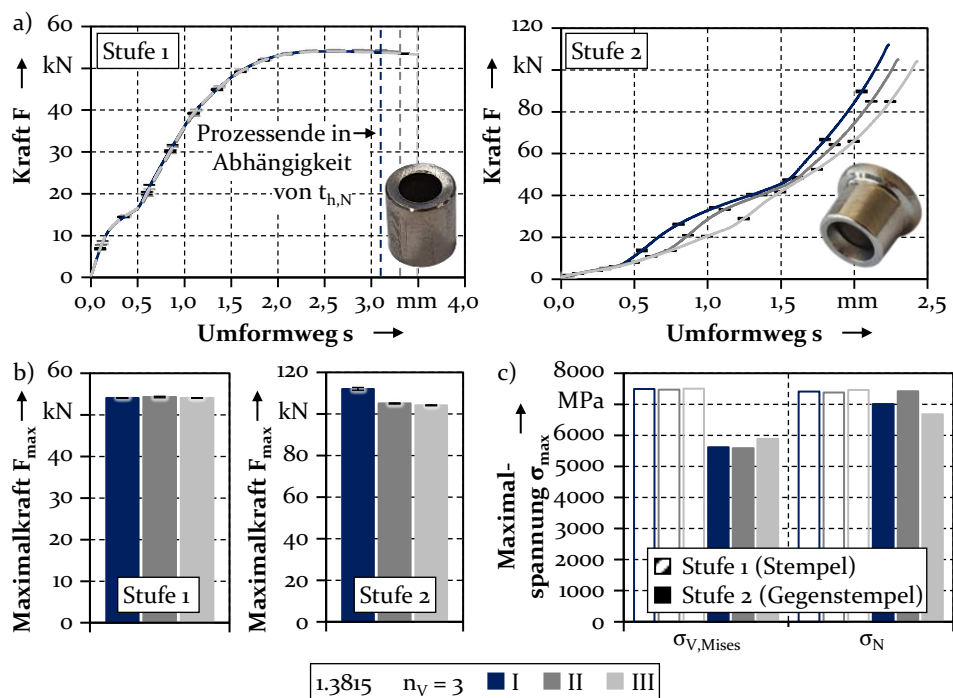


Bild 40: a) Experimentelle Kraft-Weg-Verläufe, b) experimentelle Maximalkräfte und c) numerisch ermittelte Spannungen im Werkzeug bei der Nietherstellung in Abhängigkeit von der Restbodendicke nach Stufe 1

In Stufe 1 ist kein Unterschied für die drei Varianten erkennbar außer in Bezug auf das Prozessende (vergleiche 1c in Bild 20), da eine Reduzierung der Restbodendicke eine Verringerung des Umformwegs bedingt. In Stufe 2 verschiebt sich der erste charakteristische Kraftanstieg beim Aufsetzen des Napfbodens auf der Spitze des Gegenstempels (vergleiche 2a in Bild 20) dementsprechend mit abnehmender Restbodendicke des eingesetzten Napfs. Bezüglich des Beginns der Ausformung des Nietkopfs (vergleiche 2b in Bild 20) ist kein Einfluss der zuvor erreichten Restbodendicke feststellbar. Am Prozessende (vergleiche 2c in Bild 20) wird mit abnehmender Restbodendicke bei gleichem Stempelweg ein größerer Umformweg erreicht, was auf den früheren Kontakt von Stempel und Werkstück zurückzuführen ist, welcher in der Zunahme der Napfhöhe in Verbindung mit der Verringerung der Restbodendicke begründet ist.

Bei den maximalen Prozesskräften, wie in Bild 40 b) gezeigt, liegt in Stufe 1 für die untersuchten Varianten keine Abhängigkeit von der einzustellenden Restbodendicke vor, da nach Überschreiten des Fließbunds des Stempels ein gleichbleibendes Kraftniveau erreicht wird. Beim Einsatz von Näpfen mit einer Restbodendicke von 2,1 mm beträgt die Maximalkraft in Stufe 2 $112,1 \text{ kN} \pm 0,7 \text{ kN}$. Im Vergleich hierzu ist die maximale Prozesskraft bei der Variante II um etwa 6 % und bei der Variante III um etwa 7 % geringer. Näpfe mit einer Restbodendicke von 1,9 mm weisen eine Höhe der Napfwand auf, welche bereits knapp 90 % der Schaftlänge der Niete entspricht, während bei Näpfen mit einer Restbodendicke von 2,1 mm nur etwa 82 % der Nietschaftlänge erreicht werden, was ein Erklärungsansatz für den erhöhten Kraftbedarf bei der Variante I ist. Es wird keine zunehmende Kraftreduzierung dadurch erzielt, dass dieser Wert bei Näpfen mit einer Restbodendicke von 1,7 mm mit etwa 97 % noch höher als bei einer Restbodendicke von 1,9 mm ist. Anhand der numerischen Stoffflussanalyse ist festzustellen, dass sich bereits zu Beginn des Umformprozesses in Stufe 2 im Nietschaft Zonen mit verringerter Fließgeschwindigkeit ausbilden, wenn Näpfe mit einer Restbodendicke von 1,7 mm eingesetzt werden (vergleiche Bild 39). Die Ursachen hierfür sind die gesteigerte Vorverfestigung der Näpfe und die größere Napfhöhe, wodurch die Umformung der Nietschneide früher einsetzt und in der Folge der Stofffluss im Nietschaft oberhalb der Nietschneide verlangsamt wird. Dies führt zu lokalen Geschwindigkeitsunterschieden im Nietschaft. Aufgrund dessen ergeben sich lokale Fließbehinderungen. Hierdurch wird die Verfestigung während der Umformung beeinflusst, wozu wiederum die höhere Vorverfestigung der Näpfe beiträgt. Dies wirkt der Kraftreduzierung, welche durch den Einsatz

von Näpfen mit einem hohen Verhältnis der Napfwandhöhe zu der zu erreichenden Nietschaftlänge erzielbar ist, entgegen. Demnach ist festzuhalten, dass mit einer Verringerung der Restbodendicke von weniger als 1,9 mm kaum eine weitere Reduzierung der Prozesskraft erzielt wird.

Gemäß der Analyse der in den Aktivteilen auftretenden maximalen von-Mises-Vergleichsspannung sowie der maximalen Kontaktnormalspannung, wie in Bild 40 c) dargestellt, ist für die untersuchten Varianten kein Einfluss der zu erreichenden Restbodendicke auf die Werkzeugbeanspruchung in Stufe 1 vorhanden. Dies entspricht dem Effekt, dass im untersuchten Bereich ein vergleichbares Kraftniveau unabhängig von der Restbodendicke erreicht wird. Gegenteilige Effekte treten teilweise in Stufe 2 auf. Trotz der geringeren Prozesskräfte bei den Varianten II und III, liegt bei Variante II eine maximale Kontaktnormalspannung von 7422 MPa vor, was einer Erhöhung um etwa 6 % im Vergleich zur Variante I entspricht, während bei Variante III eine im Vergleich zur Variante I um etwa 5 % erhöhte maximale von-Mises-Vergleichsspannung von 5881 MPa auftritt. Diese Unterschiede sind dadurch erklärbar, dass sich die teilweise unterschiedlichen Fließgeschwindigkeiten und die sich ergebenden lokalen Fließbehinderungen auch auf die lokalen Spannungen in den Aktivteilen auswirken. In Kombination mit der zusätzlichen Wechselwirkung mit der unterschiedlichen Vorverfestigung der Näpfe führt dies dazu, dass die Ergebnisse der lokalen Spannungsanalyse bezüglich des Einflusses der Restbodendicke nicht mit den für die globalen Prozesskräfte ermittelten Tendenzen zur Kraftreduzierung übereinstimmen.

Einfluss auf die Bauteileigenschaften

Die geometrischen Parameter der Niete in Abhängigkeit von der Restbodendicke der eingesetzten Näpfe sind in Bild 41 dargestellt. Die Messung der Restbodendicken, welche sich zu 2,10 mm, 1,90 mm und 1,70 mm mit einer jeweiligen Standardabweichung von 0,01 mm ergeben, bestätigt das Erreichen der für die Untersuchungen vorgegebenen Zielwerte. Dementsprechend weisen die Näpfe mit abnehmender Restbodendicke zunehmende Napfhöhen von $5,76 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$, $5,87 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ und $5,99 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ auf, was sich beim Stofffluss in Stufe 2 (vergleiche Bild 39) bemerkbar macht. In Stufe 2 werden für die verschiedenen Varianten Kopfdicken von $0,82 \text{ mm} \pm 0,02 \text{ mm}$ (I), $0,81 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ (II) und $0,84 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ (III) erreicht. Eine Abhängigkeit von der Restbodendicke der verwendeten Näpfe ist nicht erkennbar. Dies gilt ebenso für die Nennlänge, in Bezug auf welche sich die drei Varianten um lediglich

0,02 mm unterscheiden. Dies bedeutet auch, dass mit abnehmender Restbodendicke der Näpfe ein größerer Umformweg erforderlich ist, um eine vergleichbare Kopfdicke und Nennlänge zu erreichen. Für den Kopfdurchmesser werden Werte von $7,03 \text{ mm} \pm 0,04 \text{ mm}$ (I), $6,99 \text{ mm} \pm 0,05 \text{ mm}$ (II) und $6,90 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ (III) gemessen.

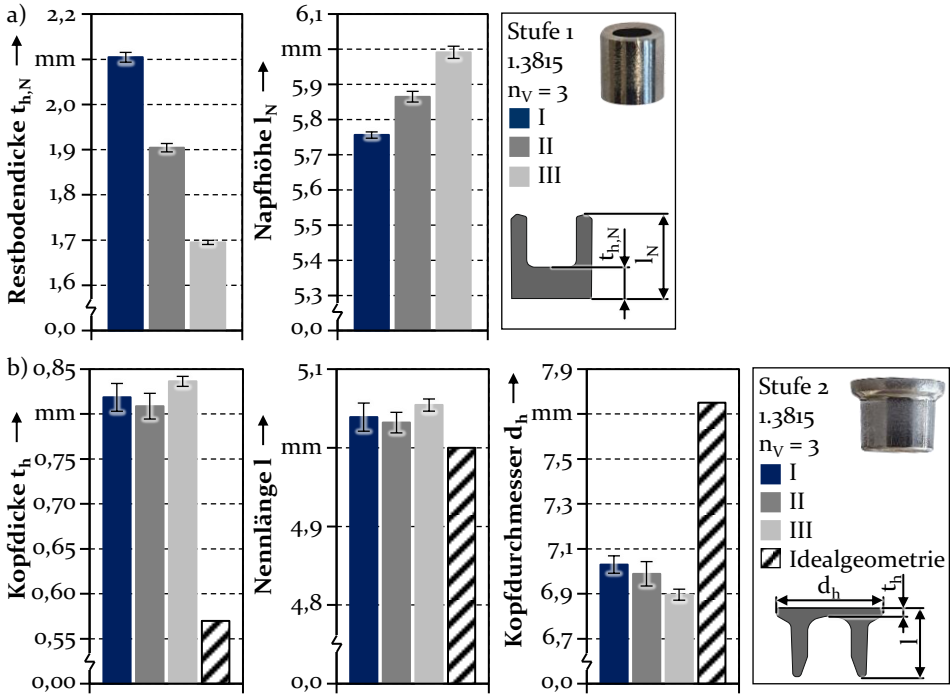


Bild 41: Geometrische Parameter der a) Näpfe nach Stufe 1 und b) Niete nach Stufe 2 in Abhängigkeit von der Restbodendicke nach Stufe 1

Mit abnehmender Restbodendicke der eingesetzten Näpfe wird tendenziell ein geringerer Kopfdurchmesser erzielt, was vor allem für die Variante III zutrifft. Demzufolge trägt die Vergrößerung des Umformwegs bei abnehmender Restbodendicke, welche sich bei der Versuchsdurchführung mit dem gleichen Stempelweg aufgrund des früheren Kontakts zwischen Stempel und Werkstück einstellt, nicht zu einer verbesserten Ausformung des Nietkopfes bei. Dies bestätigt die bereits im Rahmen der Stoffflussanalyse aufgetretene Annahme, dass der verringerte Stofffluss im äußeren Kopfbereich am Prozessende bei der Variante III (vergleiche Bild 39) zu einer Verringerung des Kopfdurchmessers führen kann. Da die erhöhte Verfestigung im Nietkopf mit abnehmender Restbodendicke in Kombination mit dem verlangsamten Stofffluss in diesem Bereich auftritt, entstehen während der

Umformung in Stufe 2 zunehmend Fließbehinderungen durch die vorverfestigten Bereiche, welche der Ausformung des Nietkopfes entgegenwirken und eine Vergrößerung des Nietkopfdurchmessers verhindern. Dies ist nachteilig in Bezug auf die für das Fügen definierte Idealgeometrie und kann mit einer Reduzierung der Verbindungsfestigkeit verbunden sein. Die Verringerung des Stoffflusses im Nietschaft beim Beginn der Ausformung des Nietkopfes bei der Variante III (vergleiche Bild 39) ist auch bei der Umformung von Nieten bei 200 °C (vergleiche Bild 31 und Bild 35) festzustellen, worauf die verbesserte Ausformung des Nietkopfes vornehmlich zurückgeführt wird. Bei Raumtemperatur hingegen trägt dieser Effekt nicht zu einer Vergrößerung des Kopfdurchmessers bei. In diesem Fall wirken die verringerte Umformbarkeit, die Verfestigung und die Bildung von lokalen Fließbehinderungen entgegen.

Im Hinblick auf die mechanischen Eigenschaften der Niete wird davon ausgegangen, dass die Unterschiede bezüglich des Kopfdurchmessers eine untergeordnete Rolle spielen und dass der Einfluss sich auf den Kopfbereich beschränkt. Eine Gegenüberstellung der Härtewerte, welche nach der Umformung unter Nutzung von Näpfen mit unterschiedlichen Restbodendicken erreicht werden, ist in Bild 42 gegeben.

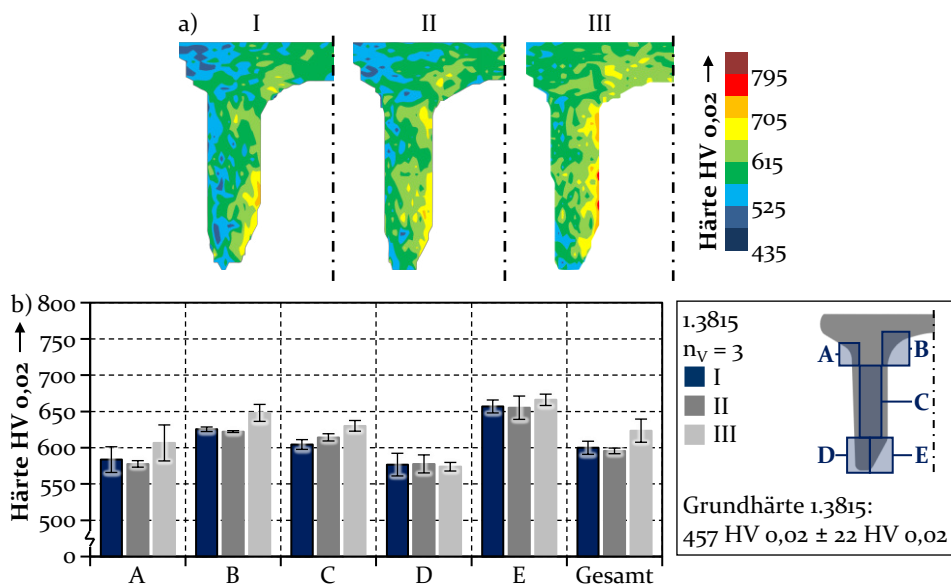


Bild 42: Härte von Nieten aus 1.3815 a) über den Bauteilquerschnitt und b) in ausgewählten Nietbereichen in Abhängigkeit von der Restbodendicke nach Stufe 1

In Bezug auf die Gesamthärte über den ganzen Bauteilquerschnitt ergibt sich für die Variante II mit $596 \text{ HV } 0,02 \pm 4 \text{ HV } 0,02$ ein Härteniveau mit

einem Unterschied von weniger als 1 % gegenüber der Variante I. Im Gegensatz hierzu beträgt die Gesamthärte für die Variante III $624 \text{ HV } 0,02 \pm 16 \text{ HV } 0,02$, was einer Steigerung um 4 % im Vergleich zur Variante I entspricht. Dies ist maßgeblich auf das Erreichen einer höheren Härte im Kopfbereich und im Nietschaft zurückzuführen, was durch eine höhere Vorverfestigung im Napfboden in Stufe 1 aufgrund der geringeren Restbodendicke und einer stärkeren Stauchung der infolgedessen erreichten längeren Napfwand verursacht wird. In diesen Bereichen wird für die Variante III eine lokale Härte von $607 \text{ HV } 0,02 \pm 25 \text{ HV } 0,02$ (A), $648 \text{ HV } 0,02 \pm 12 \text{ HV } 0,02$ (B) und $630 \text{ HV } 0,02 \pm 7 \text{ HV } 0,02$ (C) ermittelt, womit für jeden Bereich eine Tendenz zur Erhöhung der Härte um 4 % im Vergleich zur Variante I vorliegt. Insbesondere die höhere Härte im Nietschaft kann sich günstig auf das Fügen auswirken, da hierdurch einer übermäßigen Stauchung des Nietschafts [13] sowie dem Ausknicken Nietschafts [67] entgegengewirkt wird. In den Bereichen D und E betragen die Unterschiede der Härte hingegen lediglich etwa 1 %. Bei der Variante II unterscheiden sich die ermittelten Härtewerte in allen analysierten Bereichen um weniger als 2 % von den entsprechenden Härtewerten bei der Variante I. Insgesamt erfüllen die Niete aller untersuchten Varianten die grundlegenden Anforderungen bezüglich der mechanischen Eigenschaften (vergleiche Bild 7). Ein Einfluss der Restbodendicke nach Stufe 1 auf die resultierenden Nieteigenschaften ist der Analyse zufolge hauptsächlich beim Einsatz von Näpfen mit einer Restbodendicke von 1,7 mm identifizierbar. Eine Erhöhung der lokalen Härte in den ausgewählten Bereichen mit abnehmender Restbodendicke kann im Allgemeinen allerdings nicht festgestellt werden.

Eine Besonderheit im Rahmen der Untersuchung des Einflusses der Restbodendicke nach Stufe 1 fällt bei der Analyse von Mikroskopaufnahmen der unterschiedlichen Nietvarianten auf, welche in Bild 43 a) dargestellt sind. Bei allen untersuchten Nieten der Variante III wird ein rissähnlicher Spalt im inneren Übergangsbereich vom Nietschaft zum Nietkopf detektiert. Bei den übrigen Nietvarianten ist ein derartiger Fehler nicht erkennbar. Aus der numerischen Analyse der am Prozessende erreichten Umformgrade, welche in Bild 43 b) gegenübergestellt sind, geht hervor, dass für die Variante III ein maximaler Umformgrad von 5,2 in diesem Übergangsbereich erreicht wird. Im Gegensatz hierzu betragen die maximal vorliegenden Umformgrade 3,3 bei der Variante I und 4,1 bei der Variante II. Dies ist dadurch begründet, dass mit abnehmender Restbodendicke in Stufe 1 eine zunehmende Vorverfestigung im Napfboden und im Übergangsbereich zur Napfwand erreicht wird. Außerdem nimmt der maximale Umformgrad mit

steigendem Verhältnis von Napfhöhe zu Restbodendicke zu. Allerdings tritt bei der Umformung von Nieten bei 200 °C mit einem maximalen Umformgrad von 5,4 infolge des begünstigten Stoffflusses ein noch höherer Maximalwert als bei der Variante III bei Raumtemperatur auf. Da bei diesen Nieten keine vergleichbaren rissähnlichen Fehler identifizierbar sind, wird das Erreichen der hohen lokalen Umformgrade im inneren Übergangsbereich als Ursache ausgeschlossen.

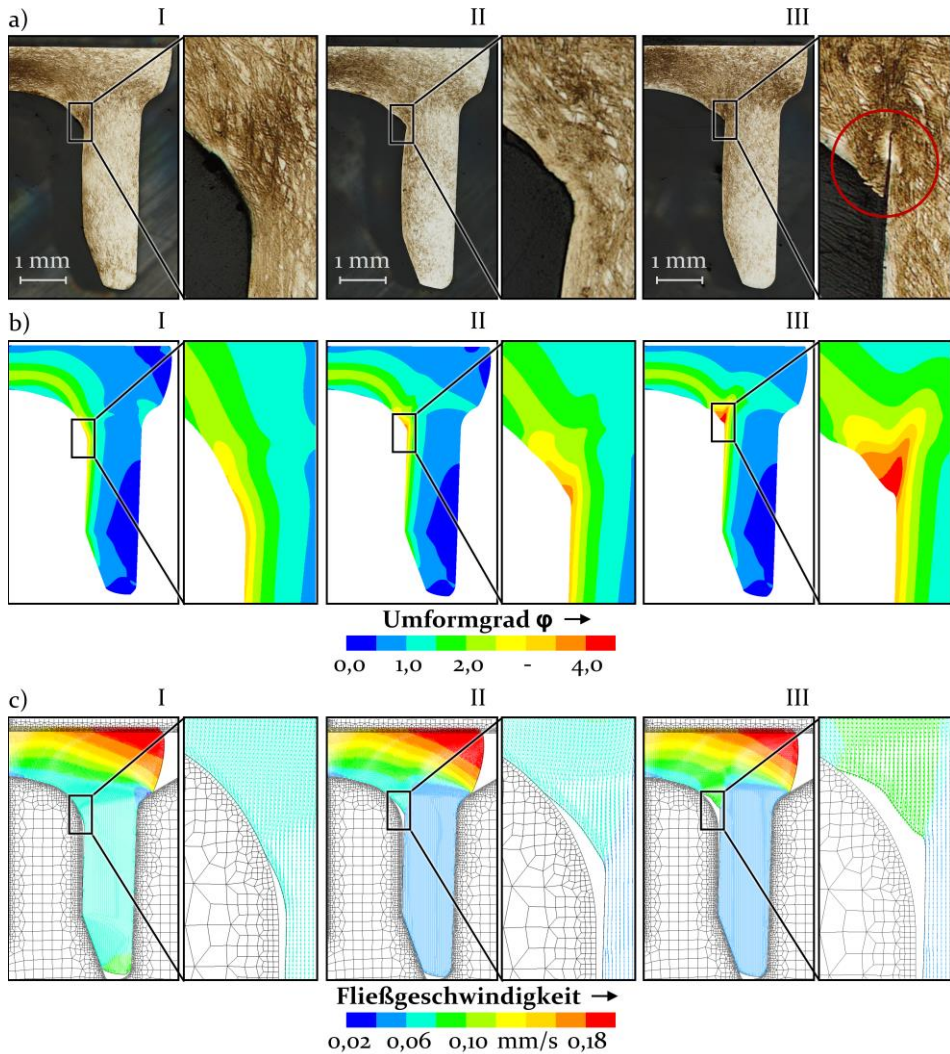


Bild 43: a) Mikroskopaufnahmen und b) Umformgradverteilung von umgeformten Nieten aus 1.3815 sowie c) Stofffluss bei der Umformung von 1.3815 in Stufe 2 in Abhängigkeit von der Restbodendicke nach Stufe 1

Stattdessen liegt die Vermutung nahe, dass es sich um einen Stoffflussfehler handelt, wie aus Bild 43 c) hervorgeht. Im Laufe der Ausformung des Nietkopfes kommt es bei der Variante III zu größeren Unterschieden hinsichtlich der Stoffflussgeschwindigkeit im Übergangsbereich als bei den anderen Nietvarianten. Derartig große Geschwindigkeitsunterschiede in diesem Bereich sind auch bei der numerischen Analyse der Nietherstellung bei 200 °C nicht zu erkennen. In der Folge ergibt sich bei der Variante III eine Verschiebung von Material aus dem Übergangsbereich entlang des Nietschafts nach unten, wodurch die Bildung von lokalen Fließbehinderungen verstärkt wird und die lokale Verfestigung in diesem Bereich zunimmt. Durch diese Materialverschiebung entsteht der identifizierte rissähnliche Spalt zwischen dem schneller nach unten fließenden Material im Übergangsbereich und dem vergleichsweise langsamer fließenden Material im Nietschaft. Zu diesem Effekt trägt das Verhältnis der Napfhöhe zur Restboddendicke der für die Umformung eingesetzten Näpfe bei. Für die Variante I liegt ein Verhältnis von 2,7 vor. Für die Variante II beträgt das Verhältnis 3,1. Für die Variante III ist das Verhältnis von 3,5 am höchsten und überschreitet auch das Verhältnis von 3,2 bei den für die Nietherstellung bei 200 °C eingesetzten Näpfen. Das Auftreten eines derartigen Stoffflussfehlers wird für das anschließende Fügen als kritisch erachtet. Da in den Übergangsbereichen vom Nietschaft zum Nietkopf ohnehin ein hohes Risiko der Rissbildung während des Stempelrückhubs beim Fügen besteht [25], würde dieses Risiko zusätzlich erhöht werden, da der infolge des Stoffflussfehlers entstehende Spalt die Rissinitiierung begünstigen würde. Folglich ist eine Eignung der Niete der Variante III für das Fügen nicht gegeben.

6.3.4 Geometrische Schwankungen der Rohlinge

Für die Nietherstellung im industriellen Umfeld wird üblicherweise gezogener Draht als Halbzeug eingesetzt. Hierbei können fertigungsbedingte Schwankungen der Abmaße des verwendeten Drahts auftreten. Um den Einfluss derartiger Schwankungen auf den Nietherstellprozess und die resultierenden Bauteileigenschaften abzubilden, werden Variantenuntersuchungen bei Raumtemperatur durchgeführt, bei welchen zylindrische Rohlinge aus dem hochstickstofflegierten Stahl 1.3815 mit unterschiedlichen Maßen zum Einsatz kommen. Eine Übersicht ist in Tabelle 12 gegeben. Der Toleranzbereich in Bezug auf die Grenzabmaße des Durchmessers von gezogenem Draht ist in der Norm DIN EN 10218-2 [155] festgelegt. In Anlehnung daran wird der Durchmesser der eingesetzten Rohlinge im Vergleich zur Referenz, deren Rohlingvolumen dem Volumen eines Niets mit der Ide-

algeometrie entspricht, um $\pm 0,10$ mm variiert. Hieraus ergibt sich eine Abweichung des Rohlingvolumens um ± 4 % im Vergleich zum Volumen bei der Referenz. Zusätzlich werden Rohlinge mit ebenfalls um $\pm 0,10$ mm variierender Höhe verwendet, was einer Abweichung des Volumens um lediglich ± 2 % verglichen mit der Referenz entspricht, da die Variation der Höhe einen geringeren Einfluss auf das Volumen der zylindrischen Rohlinge hat als die Variation des Durchmessers, welcher quadratisch in die Berechnung des Volumens eingeht.

Tabelle 12: Untersuchte Varianten für die Analyse des Einflusses der Rohlingmaße (d = Durchmesser des Rohlings, h = Höhe des Rohlings, V = Volumen des Rohlings)

Variante	Variation (Variierte Parameter: d, h, V)			Kriterium Vergleichbarkeit (Konstanter Parameter)	
	d (mm)	h (mm)	V (mm ³)	S 1	S 2
R (Referenz)	5,20	4,72	100	$t_{h,N}$	s_s
I	5,10	4,72	96		
II	5,30		104		
III	5,20	4,62	98		
IV		4,82	102		

Um eine potentielle Beeinflussung der Ergebnisse durch die Restbodendicke der Näpfe auszuschließen, wird die Restbodendicke als Kriterium der Vergleichbarkeit für Stufe 1 herangezogen und dementsprechend konstant gehalten. Für Stufe 2 wird derselbe Stempelweg für alle untersuchten Varianten gewählt, wodurch ein möglicher Einfluss der Rohlingmaße auf die erreichbare Nietgeometrie auch in Bezug auf die Kopfdicke detektiert werden kann. Derartige Abweichungen sind bei der Bewertung des Einflusses auf die mechanischen Nieteigenschaften zu berücksichtigen.

Einfluss auf den Umformprozess

Der Werkstofffluss in Stufe 2 und die Verfestigung der Bauteile, wie auf Basis der numerischen Analyse in Bild 44 abgebildet, werden von den geometrischen Maßen der zuvor eingesetzten Rohlinge beeinflusst. Da das Erreichen einer vergleichbaren Restbodendicke als Kriterium der Vergleichbarkeit definiert ist, weisen die Näpfe in Abhängigkeit vom Volumen der eingesetzten Rohlinge Unterschiede in Bezug auf die Napfhöhe auf. Aus diesen Unterschieden der Napfhöhe resultieren unterschiedliche Geschwindigkeiten des Stoffflusses nach unten in Richtung der Kavität der Matrize beim Aufsetzen des Napfbodens auf dem Gegenstempel (2a). Die Variante II mit dem größten Volumen und daher der größten Napfhöhe ist dementsprechend durch die höchste Geschwindigkeit in diesem Bereich gekennzeichnet, während bei der Variante I mit dem geringsten Volumen

die Ausformung der Nietschneide noch nicht begonnen hat und demzufolge keine Zunahme des Stoffflusses zu verzeichnen ist.

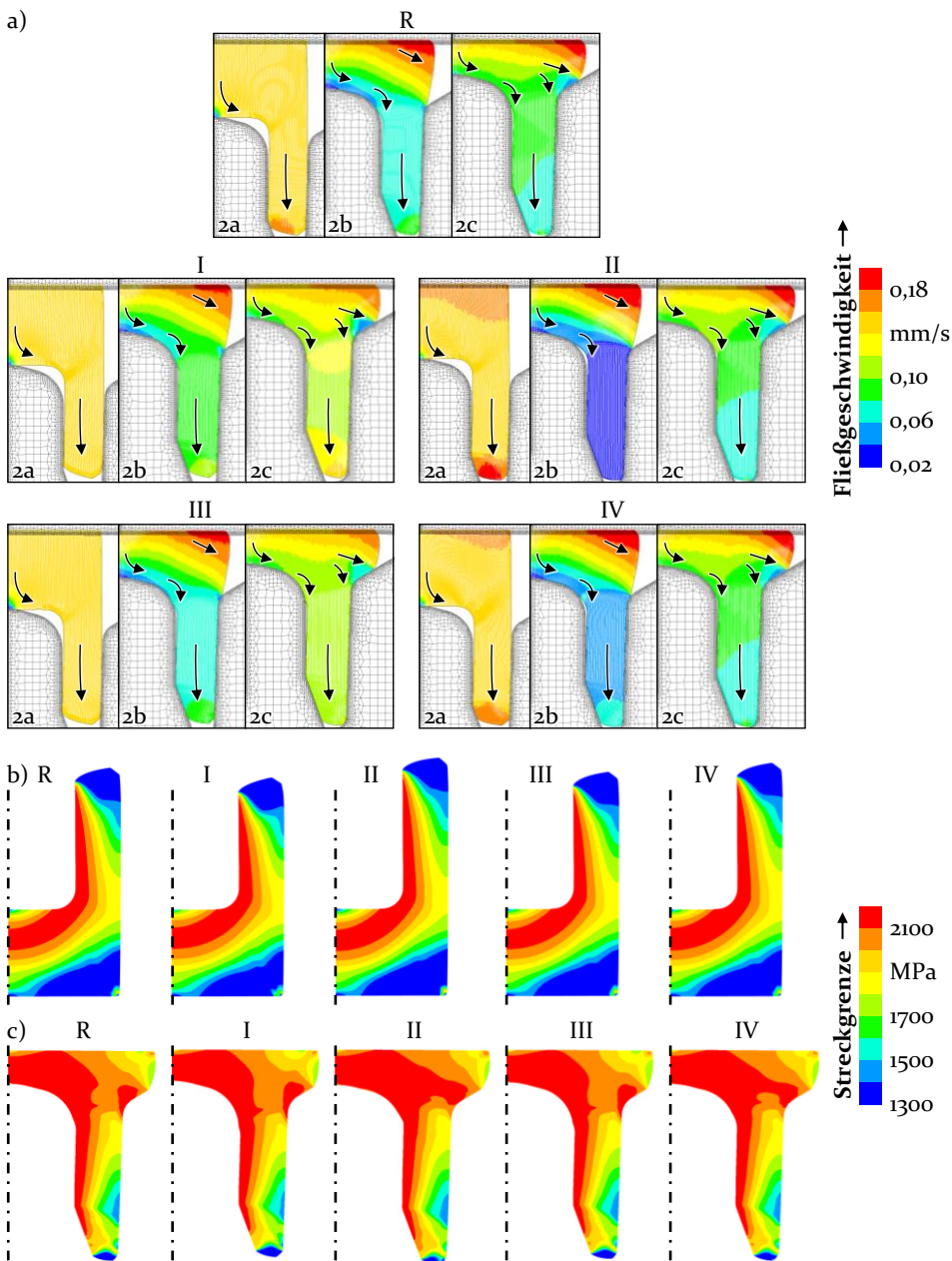


Bild 44: Werkstofffluss und Verfestigung in Abhängigkeit von den Maßen der eingesetzten Rohlinge: a) Stofffluss in Stufe 2 sowie Streckgrenze am Ende von b) Stufe 1 und c) Stufe 2

Der Einfluss der mit dem Volumen in Verbindung stehenden Napfhöhe setzt sich auch zu Beginn der Ausformung des Nietkopfes (2b) fort. Für die untersuchten Varianten führt eine Zunahme des Volumens zu einer Abnahme des Stoffflusses im Nietschaft und gleichzeitig tendenziell zu einer Zunahme des radialen Stoffflusses im äußeren Bereich des Nietkopfes, was das Erreichen eines größeren Kopfdurchmessers begünstigen kann. In Bezug auf die Vorverfestigung im Napf treten kaum Unterschiede in Abhängigkeit vom Rohlingvolumen auf, weshalb am Anfang des Umformprozesses keine größere Anzahl an lokalen Fließbehinderungen durch vorverfestigte Bereiche vorliegt. Mit fortschreitender Umformung nimmt der Stofffluss im Kopfbereich somit zu und trägt zu einer verbesserten Ausformung des Nietkopfes bei. Dies wiederum stellt die Ursache dafür dar, dass bei den Varianten mit größerem Rohlingvolumen im Übergangsbereich vom Nietkopf zum Nietschaft die lokalen Festigkeiten auf über 2100 MPa gesteigert werden. Die beiden Varianten I und III mit einem geringeren Volumen als die Referenz weisen am Prozessende (2c) zwar höhere Stoffflussgeschwindigkeiten im Nietschaft als die Referenz und die beiden Varianten mit größerem Volumen auf, aber sind auch durch einen verringerten Stofffluss im äußeren Bereich des Nietkopfes gekennzeichnet. Dies ist hauptsächlich auf die volumenbedingt geringere Werkstoffmenge, welche für die Umformung zur Verfügung steht, zurückzuführen. Daher ist für diese beiden Varianten ein verringerter Kopfdurchmesser zu erwarten. Dies wäre als nachteilig im Hinblick auf eine potentiell hierdurch verringerte Verbindungsfestigkeit zu bewerten und ist daher im Rahmen der Analyse der geometrischen Bauteileigenschaften zu überprüfen.

Der Einfluss der Schwankungen der Rohlingmaße auf den Kraft-Weg-Verlauf ist anhand von Bild 45 a) erkennbar. In Stufe 1 zeigen sich vornehmlich für die beiden Varianten I und II Unterschiede bezüglich des charakteristischen Kraftanstiegs, welcher mit dem Auftreten des Kontakts zwischen Rohling und Matrize (vergleiche 1a in Bild 20) in Verbindung steht. Bei einem geringeren Durchmesser als bei der Referenz kommt der Rohling später in Kontakt mit der Matrize, bei einem größeren Durchmesser dementsprechend früher. In der Folge ist auch der Zeitpunkt des Erreichens eines gleichbleibenden Kraftniveaus nach Überschreiten des Fließbunds am Stempel (vergleiche 1b in Bild 20) vom Durchmesser abhängig. Für die ersten beiden charakteristischen Prozessablaufschritte ist der Durchmesser demnach entscheidend, während die Höhe keinen Einfluss hat. Für das Prozessende in Stufe 1 (vergleiche 1c in Bild 20) hingegen spielt die Höhe eine Rolle, da bei einer geringeren Höhe auch ein geringerer Umformweg bzw. bei einer größeren Höhe ein größerer Umformweg erforderlich ist,

um eine vergleichbare Restbodendicke zu erreichen. In Stufe 2 besteht ein Zusammenhang zwischen dem Zeitpunkt des Aufsetzens des Napfbodens auf der Spitze des Gegenstempels (vergleiche 2a in Bild 20) und dem Volumen der eingesetzten Rohlinge. Je geringer das Volumen, desto früher wird dieser Prozessschritt erreicht. Dies ist dadurch begründet, dass bei gleicher Restbodendicke mit zunehmendem Volumen die Napfhöhe zunimmt. Bei einer größeren Napfhöhe beginnt die Ausformung der Nietscheide bereits vor dem Aufsetzen des Napfbodens. In der Folge treten durch den hierdurch veränderten Stofffluss begründet auch Unterschiede hinsichtlich des Beginns der Ausformung des Nietkopfes (vergleiche 2b in Bild 20) und des Prozessendes (vergleiche 2c in Bild 20) auf. Die volumenbedingten Unterschiede der Napfhöhe führen entsprechend zu einer Verringerung oder Vergrößerung des Umformwegs, wenn derselbe Stempelweg gewählt wird.

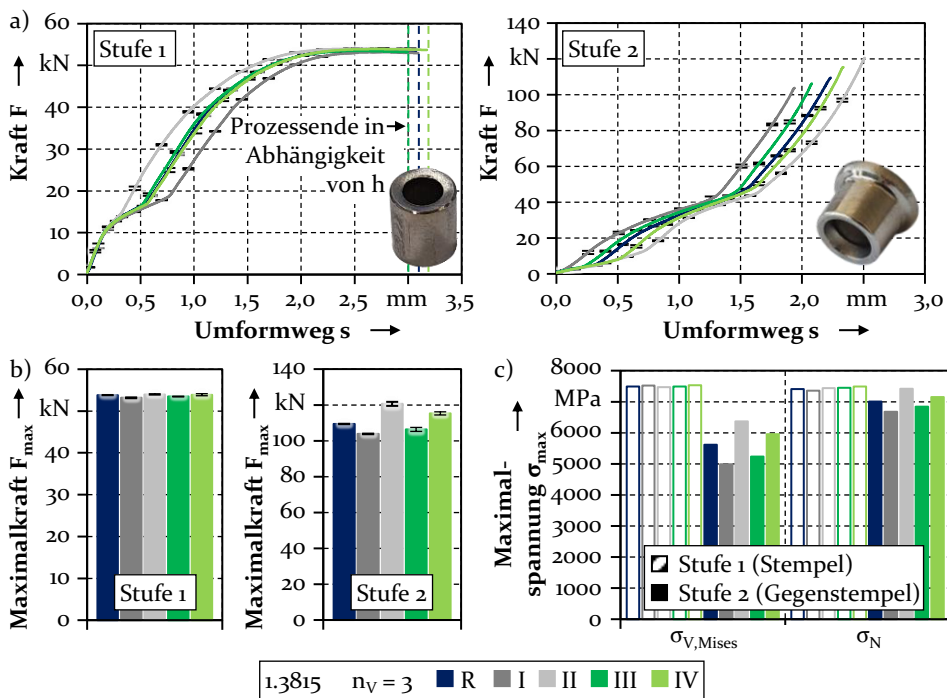


Bild 45: a) Experimentelle Kraft-Weg-Verläufe, b) experimentelle Maximalkräfte und c) numerisch ermittelte Spannungen im Werkzeug bei der Nietherstellung in Abhängigkeit von den Maßen der eingesetzten Rohlinge

In Bezug auf die maximalen Prozesskräfte, wie in Bild 45 b) gezeigt, ist in Stufe 1 kein erkennbarer Einfluss der Rohlingmaße vorhanden. Die Abweichungen betragen etwa 1 %. Das liegt daran, dass bei allen Varianten nach

Überschreiten des Fließbunds am Stempel ein gleichbleibendes Kraftniveau erreicht wird, während der Werkstoff weiter entgegen der Stempelrichtung fließt. Da der Werkstofffluss nach oben nicht begrenzt ist, hat das Rohlingvolumen keinen Einfluss. In Stufe 2 hingegen ist ein Anstieg der Maximalkraft mit zunehmendem Volumen der zuvor für Stufe 1 eingesetzten Rohlinge zu verzeichnen. Bei der Variante I, welche mit einem um 4 % geringeren Volumen im Vergleich zur Referenz das geringste Volumen der untersuchten Varianten aufweist, wird eine Maximalkraft von $103,8 \text{ kN} \pm 0,2 \text{ kN}$ erreicht. Mit zunehmendem Rohlingvolumen erhöht sich die maximale Prozesskraft um 2 % (III), 5 % (R), 11 % (IV) und 16 % (II). Wenn der umzuformende Napf entsprechend dem verwendeten Rohling ebenfalls ein größeres Volumen aufweist, ist infolgedessen ein erhöhter Kraftbedarf für die Umformung zum Niet erforderlich. Da der Durchmesser quadratisch in die Berechnung des Volumens eingeht, hat der Durchmesser einen größeren Einfluss als die Höhe. Da bei den Varianten mit größerem Volumen höhere lokale Fließgeschwindigkeiten im Bereich des Nietkopfes auftreten, ergibt sich eine höhere Verfestigung im Nietkopf mit fortschreitender Umformung. Dies stellt neben der größeren Menge an umzuformendem Material eine zusätzliche Ursache für die Zunahme der maximalen Prozesskraft mit zunehmendem Volumen der eingesetzten Rohlinge dar. Die Kenntnis der Zusammenhänge zwischen den Rohlingmaßen und den Prozesskräften ist vor allem von Bedeutung, wenn die maximale Prozesskraft kritische Werte in Bezug auf die damit verbundene Werkzeugbeanspruchung erreicht.

Die Spannungen im Werkzeug in Abhängigkeit von den untersuchten Rohlingvarianten sind in Bild 45 c) dargestellt. Es sind vergleichbare Zusammenhänge wie bei der Analyse der Prozesskräfte identifizierbar. In Stufe 1 ist bei Unterschieden von höchstens etwa 1 % kein erkennbarer Einfluss der Rohlingmaße auf die auftretenden Spannungen vorhanden. In Stufe 2 allerdings führt eine Zunahme des Rohlingvolumens zu einer Erhöhung der Werkzeugbeanspruchung, was sich auf die größere Menge an Werkstoff und die zunehmende Verfestigung im Bereich des Nietkopfes zurückführen lässt. Die maximale von-Mises-Vergleichsspannung bei der Variante I mit dem geringsten Volumen beträgt 4990 MPa, die maximale Kontaktnormalspannung liegt bei 6679 MPa. Im Vergleich hierzu sind die Maximalwerte der von-Mises-Vergleichsspannung bei den anderen Varianten um 5 % (III), 13 % (R), 19 % (IV) und 28 % (II) erhöht. In Bezug auf die Kontaktnormalspannung treten um 2 % (III), 5 % (R), 7 % (IV) und 11 % (II) höhere Spannungswerte auf. Wie bei den Prozesskräften liegt auch in diesem Fall

ein größerer Einfluss des Durchmessers als der Höhe vor. Besonders erwähnenswert in diesem Zusammenhang ist, dass bei den durchgeführten Variantenuntersuchungen eine Vergrößerung des Durchmessers um lediglich 0,1 mm, was einer Zunahme des Volumens um 4 % entspricht, zu einer Erhöhung der maximalen Kontaktnormalspannung um bereits mehr als 400 MPa führt. Ist ein Prozess an der Grenze der Werkzeugbeanspruchung ausgelegt, sodass die während der Umformung auftretenden maximalen Spannungen im Werkzeug diese Grenze gerade nicht überschreiten, können Schwankungen des Durchmessers des zugeführten Drahts demnach besonders kritisch sein und im schlimmsten Fall zu einem Werkzeugversagen führen. Daher ist insbesondere der Einfluss des Durchmessers als relevant zu bewerten.

Einfluss auf die Bauteileigenschaften

Bei der Untersuchung der Bauteileigenschaften stellt sich ein besonderer Effekt infolge der geometrischen Schwankungen der Rohlinge heraus, welcher die Konzentrität der umgeformten Näpfe betrifft. Die Bewertung der erreichten Konzentrität erfolgt auf Basis der Messung der Wanddicke der Näpfe mittels Mikroskop, wie es in Bild 46 veranschaulicht ist. Hierbei werden die Abweichungen Δx bzw. Δy der gegenüberliegenden Wanddicken a und b bzw. c und d ermittelt. Eine verringerte Konzentrität spiegelt sich in erhöhten Werten für Δx und Δy wider.

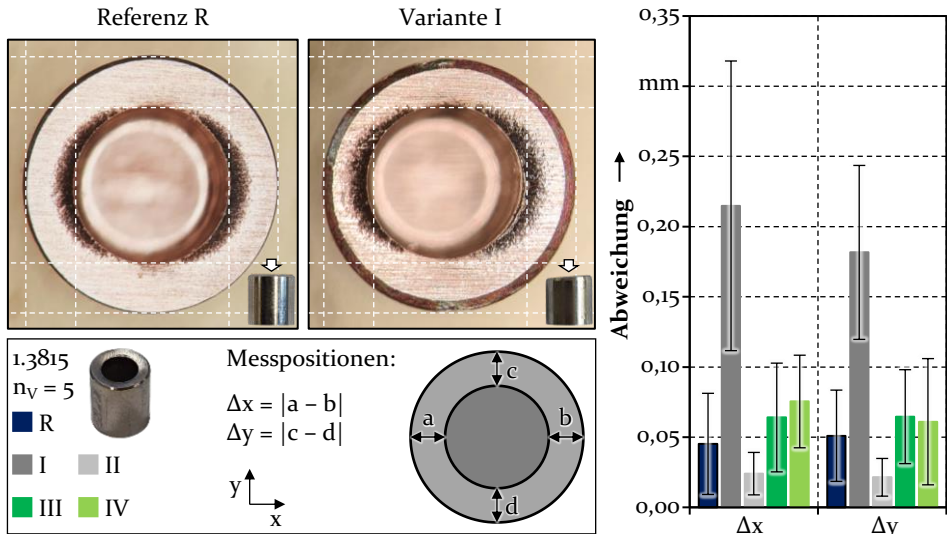


Bild 46: Abweichungen in Bezug auf die Konzentrität der Näpfe aus 1.3815 in Abhängigkeit von den Maßen der eingesetzten Rohlinge

Während für die Referenz Abweichungen von $0,05 \text{ mm} \pm 0,04 \text{ mm}$ (Δx) und $0,05 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ (Δy) erreicht werden, weisen die Näpfe der Variante I Abweichungen von $0,22 \text{ mm} \pm 0,10 \text{ mm}$ (Δx) und $0,18 \text{ mm} \pm 0,06 \text{ mm}$ (Δy) auf. Bei der Variante II ist eine Reduzierung der Abweichungen im Vergleich zur Referenz feststellbar, wobei auf Basis der vorliegenden Standardabweichungen der Einfluss auf die Konzentrität nur als Tendenz gewertet werden kann. Die Abweichungen bei den Näpfen der beiden Varianten III und IV sind in Anbetracht der zugehörigen Standardabweichungen auf einem vergleichbaren Niveau wie bei der Referenz einzuordnen. Die Ursache dafür, dass die Näpfe der Variante I durch eine schlechtere Konzentrität als die Referenznäpfe gekennzeichnet sind, liegt darin begründet, dass die Positionierung des Rohlings in der Matrize durch den Rohlingdurchmesser beeinflusst ist. Aufgrund des verringerten Durchmessers hat der Rohling mehr Spiel in der Matrize, wodurch eine außermittige Positionierung begünstigt wird. Dies kann schwerwiegende Folgen in Bezug auf die Werkzeugbeanspruchung haben. Bei der Verwendung der Näpfe für die Umformung in Stufe 2 besteht aufgrund der schwankenden Wanddicke die Gefahr der ungleichmäßigen Beanspruchung des Gegenstempels, was zum Versagen des Gegenstempels führen kann. Dies wird dadurch verstärkt, dass infolge des außermittigen Eindringens des Stempels in Stufe 1 nicht nur die Wanddicke variiert, sondern damit verbunden auch die Napfhöhe, wie in Bild 46 bei der Seitenansicht der Näpfe erkennbar ist. Vor diesem Hintergrund ist der Einfluss eines verringerten Durchmessers der Rohlinge auf den Umformprozess als kritisch einzustufen. Im industriellen Umfeld sollte daher die Festlegung des Matrizeninnendurchmessers unter Berücksichtigung der unteren Toleranz des Drahtdurchmessers erfolgen oder ein vorgelagertes Anstauchen des Drahtabschnitts zur Erreichung eines konstanten Durchmessers vorgesehen werden. Um das Risiko des Versagens des Gegenstempels im Rahmen der experimentellen Untersuchungen möglichst gering zu halten, werden für die nachfolgende Umformung in Stufe 2 daher gezielt Näpfe mit einer maximalen Abweichung der Wanddicken von $0,20 \text{ mm}$ ausgewählt. Ausgehend hiervon wird die erreichte Konzentrität der Niete überprüft, da eine mangelnde Konzentrität das Fügeergebnis beeinflussen und eine ungleichmäßige Hinterschnittausbildung verursachen könnte. Auch wenn ein Napf eine Abweichung Δx oder Δy von $0,20 \text{ mm}$ nach Stufe 1 aufweist, betragen Δx und Δy nach der Umformung in Stufe 2 maximal $0,05 \text{ mm}$. Demnach zeigt sich, dass eine schlechtere Konzentrität der Näpfe in Stufe 2 kompensiert werden kann, sofern die Abweichungen der Wanddicken nicht so groß sind, dass sie zu einem Versagen des Gegenstempels führen. Dennoch ist ein Einfluss der mangelnden Konzentrität der Näpfe der Variante I auf

die erreichten Nieteigenschaften nach Stufe 2 in Bezug auf eine symmetrische Härteverteilung nicht vollständig auszuschließen und muss daher überprüft werden.

Eine Übersicht über die geometrischen Parameter der Bauteile in Abhängigkeit von den Rohlingmaßen ist in Bild 47 gegeben. Die Restbodendicken der Näpfe nach Stufe 1 weisen eine maximale Abweichung von 0,02 mm auf. Das Erreichen einer vergleichbaren Restbodendicke, welches als Kriterium der Vergleichbarkeit definiert ist, ist somit gegeben. Der Einfluss schwankender Restbodendicken in Stufe 2 ist daher auszuschließen.

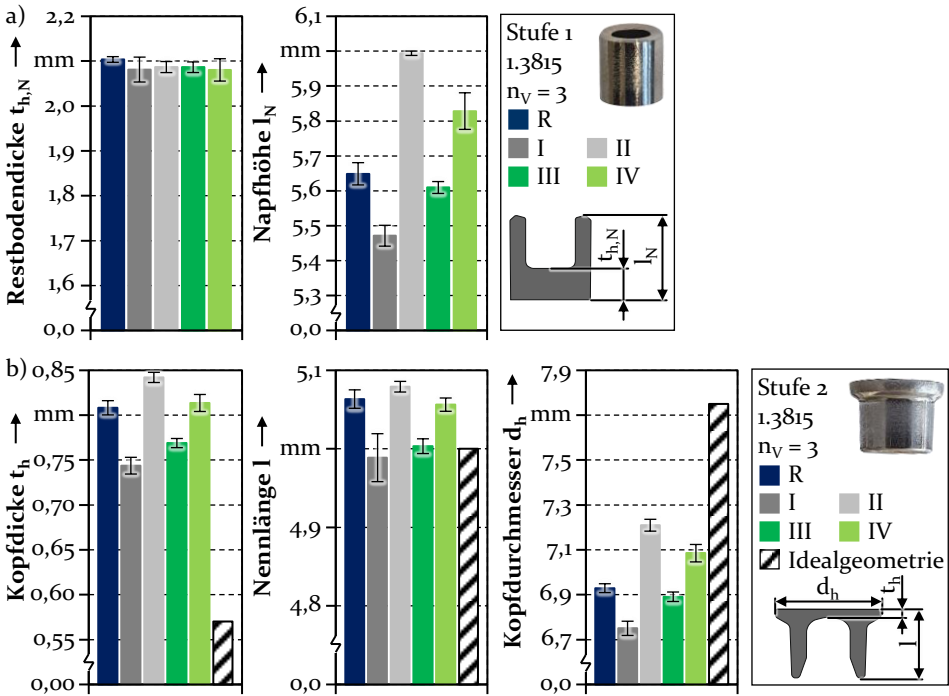


Bild 47: Geometrische Parameter der a) Näpfe nach Stufe 1 und b) Niete nach Stufe 2 in Abhängigkeit von den Maßen der eingesetzten Rohlinge

Ein Einfluss der mangelnden Konzentrizität der Näpfe der Variante I ist nicht zu erkennen. Die Standardabweichung der Napfhöhe unterscheidet sich kaum von der bei den Referenznäpfen ermittelten Standardabweichung, was allerdings auch durch die gezielte Auswahl von Näpfen mit möglichst geringen Abweichungen der Wanddicken begründet ist. Die Napfhöhe erreicht Werte zwischen $5,47 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ für die Variante I mit dem geringsten Volumen und $5,99 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ für die Variante II

mit dem größten Volumen. Gemäß den Volumenunterschieden der eingesetzten Rohlinge weisen die Näpfe bei gleicher Restbodendicke eine zunehmende Napfhöhe mit zunehmendem Volumen auf. Für die geometrischen Parameter der Niete nach Stufe 2 ergibt sich ein vergleichbarer Zusammenhang. Da ein gleicher Stempelweg als Kriterium der Vergleichbarkeit für Stufe 2 definiert ist, werden unterschiedliche Kopfdicken der Niete in Abhängigkeit vom Volumen erreicht. Auch für die Nennlänge und den Kopfdurchmesser ist die Abhängigkeit vom Rohlingvolumen identifizierbar. Infolge der schwankenden Rohlingmaße variiert die Kopfdicke von $0,74 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ (I) bis $0,84 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ (II). Die Nennlänge schwankt zwischen $4,99 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ (I) und $5,08 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ (II), wobei die Abhängigkeit vom Rohlingvolumen für die Referenz R und die Variante IV nicht zutrifft. Der Kopfdurchmesser erreicht in Abhängigkeit vom Volumen des Rohlings Werte zwischen $6,75 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ (I) und $7,21 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ (II). Da bei den Varianten mit größerem Rohlingvolumen höhere lokale Fließgeschwindigkeiten im Kopfbereich auftreten, wird die Ausformung des Nietkopfes begünstigt. Aufgrund dessen wird mit zunehmendem Volumen ein größerer Kopfdurchmesser erreicht, obgleich die Verfestigung im Bereich des Nietkopfes hierdurch mit fortschreitender Umformung zunimmt. Dementsprechend ist wie bereits bei den Prozesskräften und den Spannungen im Werkzeug ein größerer Einfluss des Durchmessers als der Höhe der Rohlinge zu verzeichnen. Es ist festzuhalten, dass ein zunehmendes Rohlingvolumen bei gleichem Stempelweg zu einer Zunahme der Kopfdicke und des Kopfdurchmessers führt, da mehr Werkstoff für die Umformung zur Verfügung steht und der Stofffluss im Kopfbereich begünstigt ist. In Bezug auf die Idealgeometrie beim Fügen ergibt sich hier ein Konflikt, da durch eine geringere Kopfdicke mehr Platz für die Aufnahme des Butzens des stempelseitigen Fügeteils verfügbar ist, aber die damit verbundene Verringerung des Kopfdurchmessers zu einer Reduzierung der Verbindungsfestigkeit führen kann. Da eine Verringerung des Kopfdurchmessers als kritischer für das Fügeergebnis eingestuft wird, wird eine Abnahme des Rohlingvolumens als nachteiliger für den Fügeprozess angenommen.

Ferner ist zu berücksichtigen, dass die Veränderungen der geometrischen Parameter in Abhängigkeit vom Volumen Auswirkungen auf die mechanischen Bauteileigenschaften haben können. Die resultierenden Härtewerte für mit unterschiedlichen Rohlingvarianten umgeformte Niete sind in Bild 48 gegenübergestellt.

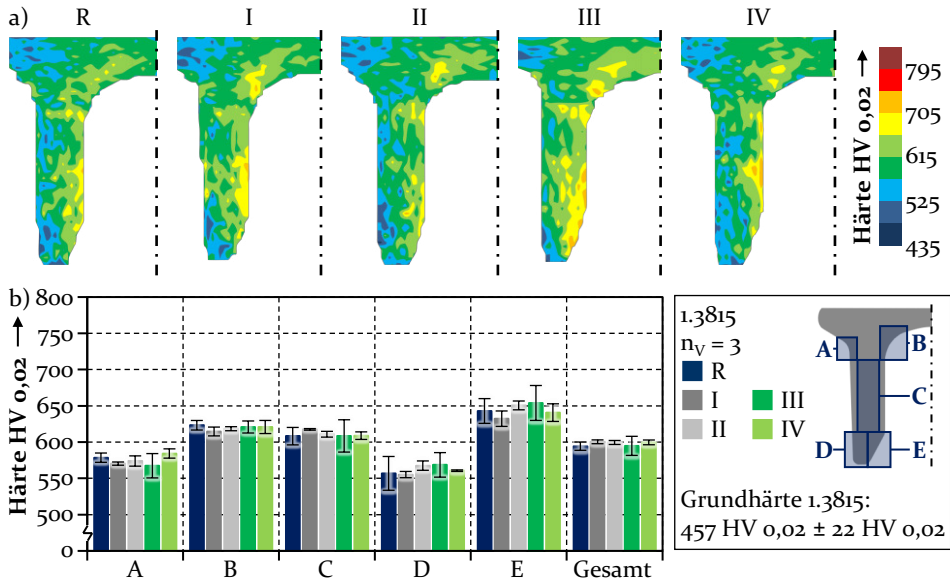


Bild 48: Härte von Nieten aus 1.3815 a) über den Bauteilquerschnitt und b) in ausgewählten Nietbereichen in Abhängigkeit von den Maßen der eingesetzten Rohlinge

Obgleich die Nieten in Abhängigkeit von den eingesetzten Rohlingvarianten unterschiedliche geometrische Parameter aufweisen, betragen die Unterschiede der Gesamthärte sowie der lokalen Härte in den Bereichen A bis E maximal 2 % im Vergleich zur Referenz R. Darüber hinaus erfolgt für die Nieten der Variante I eine Härteanalyse des gesamten Bauteilquerschnitts, um anhand eines Vergleichs der beiden Querschnittshälften den potentiellen Einfluss der bei dieser Variante vorliegenden mangelnden Konzentrität der Näpfe nach Stufe 1 zu überprüfen. Die Abweichungen der lokalen Härte zwischen den Querschnittshälften der Nieten sind für jeden der analysierten Bereiche ebenfalls geringer als 2 %, wobei zu berücksichtigen ist, dass für die Umformung in Stufe 2 gezielt Näpfe mit möglichst geringen Abweichungen der Wanddicken eingesetzt wurden, um das Risiko für das Versagen des Gegenstempels aufgrund ungleichmäßiger Beanspruchung möglichst gering zu halten. Dementsprechend sind Auswirkungen einer mangelnden Konzentrität der in Stufe 2 eingesetzten Näpfe auf das Fügeergebnis, wie beispielsweise eine ungleichmäßige Hinterschnittausbildung, nicht mit Sicherheit auszuschließen. Abgesehen hiervon ist kein wesentlicher Einfluss der Rohlingmaße und der damit verbundenen Volumenschwankungen auf die mechanischen Nieteigenschaften identifizierbar. Die an die Nieten gestellten Anforderungen (vergleiche Bild 7) sind

damit unabhängig von den untersuchten Rohlingmaßen erfüllt. Im Hinblick auf die festgelegten Toleranzbereiche für die Abmessungen des im industriellen Umfeld als Halbzeug eingesetzten Drahts können Auswirkungen von geometrischen Schwankungen auf die resultierenden mechanischen Nieteigenschaften weitestgehend ausgeschlossen werden.

6.4 Analyse werkstoffseitiger Einflussgrößen

Neben den zuvor erläuterten prozesseitigen Einflussgrößen wurde der Nietwerkstoff als Einflussfaktor auf den Nietherstellprozess und die Bauteileigenschaften identifiziert. Um den Einfluss des eingesetzten Werkstoffs zu analysieren, werden Untersuchungen bei Raumtemperatur mit dem Edelstahl 1.4541 zusätzlich zum hochstickstofflegierten Stahl 1.3815 durchgeführt, wie Tabelle 13 zu entnehmen ist.

Tabelle 13: Untersuchte Varianten für die Analyse des Einflusses werkstoffseitiger Einflussgrößen unter Nutzung der beiden Werkstoffe 1.3815 und 1.4541 als Nietwerkstoff

Variante	Werkstoffseitige Einflussgrößen	Kriterium Vergleichbarkeit (Konstanter Parameter)	
		S 1	S 2
1.3815	$R_{p0,2} = 774 \text{ MPa}$	$t_{h,N}$	t_h
	$n = 0,27$		
	Ausgangshärte = 457 HV 0,02		
1.4541	$R_{p0,2} = 634 \text{ MPa}$		
	$n = 0,19$		
	Ausgangshärte = 362 HV 0,02		

Wie bereits in Bild 22 dargestellt, liegt bei der Analyse der werkstoffseitigen Einflussgrößen der Fokus auf der Fließgrenze $R_{p0,2}$, der Kaltverfestigung, welche durch den Verfestigungsexponenten n beschrieben wird, sowie der Ausgangshärte. Es wird angenommen, dass sich ergebende Unterschiede in Bezug auf den Umformprozess und die Bauteileigenschaften maßgeblich auf Unterschiede hinsichtlich der genannten mechanischen Werkstoffeigenschaften zurückzuführen sind, weshalb diese bei der Evaluierung der Ergebnisse einbezogen werden. Als Kriterium der Vergleichbarkeit wird das Erreichen einer vergleichbaren Restbodendicke in Stufe 1 und einer vergleichbaren Kopfdicke in Stufe 2 für beide Werkstoffe definiert, was durch eine Anpassung des Stempelwegs in Abhängigkeit vom verwendeten Werkstoff erreicht wird.

Einfluss auf den Umformprozess

Der Werkstofffluss in beiden Umformstufen des Nietherstellprozesses und die erreichte Bauteilfestigkeit am Prozessende sind in Bild 49 für die Verwendung von 1.3815 und 1.4541 gegenübergestellt. In Stufe 1 sind keine relevanten Unterschiede des Stoffflusses in Abhängigkeit vom Werkstoff zu identifizieren, während in Stufe 2 Auswirkungen des Einsatzes unterschiedlicher Nietwerkstoffe erkennbar sind. Demzufolge ist anzunehmen, dass die Unterschiede bezüglich des Stoffflusses in Stufe 2 maßgeblich durch die unterschiedliche Vorverfestigung und Umformbarkeit der Werkstoffe im Hinblick auf das Fließspannungsniveau hervorgerufen werden.

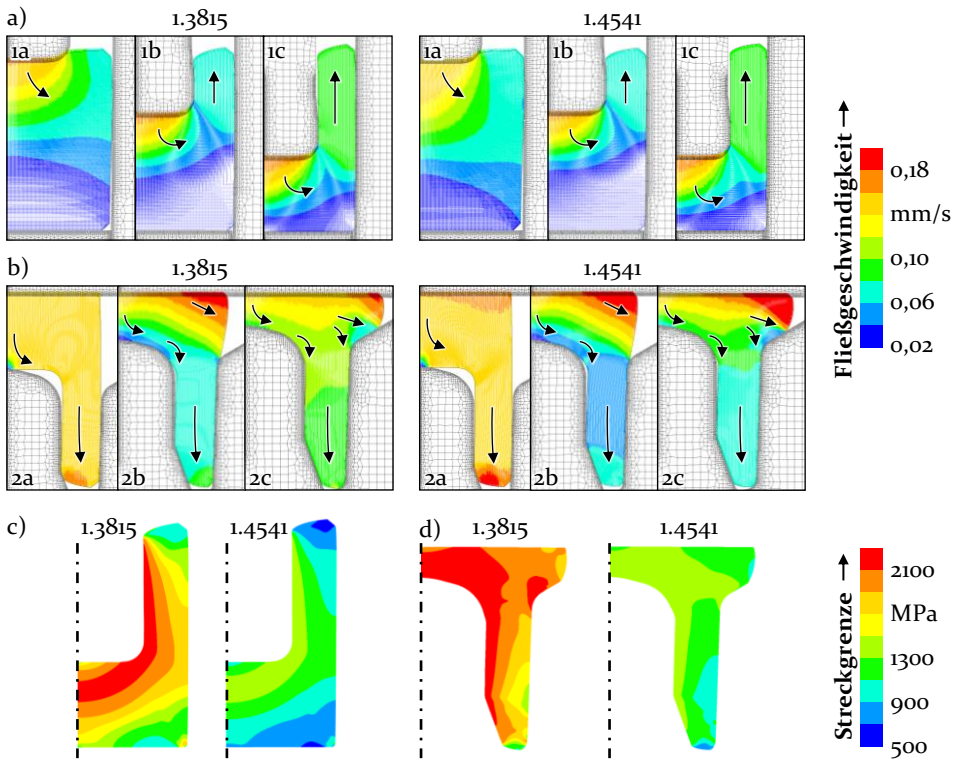


Bild 49: Werkstofffluss und Verfestigung in Abhängigkeit vom eingesetzten Nietwerkstoff: Stofffluss in a) Stufe 1 und b) Stufe 2 sowie Streckgrenze am Ende von c) Stufe 1 und d) Stufe 2

Bereits beim Aufsetzen des Napfbodens auf der Spitze des Gegenstempels (2a) liegt bei der Umformung von 1.4541 ein erhöhter Stofffluss in Richtung der unteren Kavität der Matrize vor. Da die Näpfe für beide Werkstoffe eine vergleichbare Restbodendicke sowie Napfhöhe aufweisen, worauf im Rahmen der Analyse der geometrischen Parameter noch einge-

gangen wird, ist in diesem Fall die Napfhöhe als Haupteinflussfaktor auszuschließen. Vielmehr deutet sich bereits hier der Einfluss der verbesserten Umformbarkeit des Edelstahls 1.4541 und der geringeren Vorverfestigung an, was bei der Gegenüberstellung der erzielten Festigkeiten in Näpfen aus 1.3815 und 1.4541 in Bild 49 besonders deutlich wird. Beim Beginn der Ausformung des Nietkopfes (2b) ist beim Einsatz von 1.4541 im Vergleich zu 1.3815 der Stofffluss im Nietschaft verringert, während der radiale Stofffluss im äußeren Bereich des Nietkopfes zunimmt. Dieser Effekt ist vergleichbar mit den in Bild 35 gezeigten Ergebnissen für bei 200 °C umgeformte Niete aus 1.3815, was für die verbesserte Umformbarkeit in Form eines geringeren Fließspannungsniveaus als Ursache spricht. Noch am Prozessende (2c) weist der äußere Bereich des Nietkopfes bei der Verwendung von 1.4541 einen größeren Bereich mit höherer Stoffflussgeschwindigkeit auf, während der Stofffluss im Nietschaft geringer ist als bei der Umformung von 1.3815, was die Ausformung des Nietkopfes zusätzlich begünstigt. Daher ist zu erwarten, dass sich die werkstoffbedingten Unterschiede des Stoffflusses auch in den erreichten geometrischen Parametern der Niete widerspiegeln. Der veränderte Stofffluss und die unterschiedliche Verfestigung in Abhängigkeit vom Nietwerkstoff führen zu Unterschieden in Bezug auf die erzielbare Nietfestigkeit. Für die Niete aus 1.4541 betragen die numerisch ermittelten maximalen Festigkeitswerte weniger als 1500 MPa. Dies ist im Hinblick auf die beim Fügen auftretenden hohen Spannungen im Innenbereich des Niets von bis zu 1830 MPa [25] als kritisch zu beurteilen. In der Vergangenheit wurde der Ansatz rostfreien Stahl als Nietwerkstoff zu nutzen bereits zum Beispiel von Schulz-Beenken und Budde [28] sowie von Hahn et al. [29] vorgestellt. Die Problematik, dass die hierbei erreichte Festigkeit der Niete für den Einsatz moderner hochfester Blechwerkstoffe nicht ausreicht, ist bekannt [124].

Die Kraft-Weg-Verläufe beim Einsatz unterschiedlicher potentieller Nietwerkstoffe sind in Bild 50 a) dargestellt. In Stufe 1 tritt der Kontakt zwischen Rohling und Matrize (vergleiche 1a in Bild 20) bei der Verwendung von 1.4541 früher ein als beim Einsatz von 1.3815. Dies resultiert vor allem aus der geringeren Fließgrenze und der besseren Umformbarkeit von 1.4541. Folglich ist bei der Nutzung von 1.4541 auch ein geringerer Umformweg erforderlich, um am Prozessende (vergleiche 1c in Bild 20) eine vergleichbare Restbodendicke der Näpfe wie bei der Verwendung von 1.3815 zu erreichen.

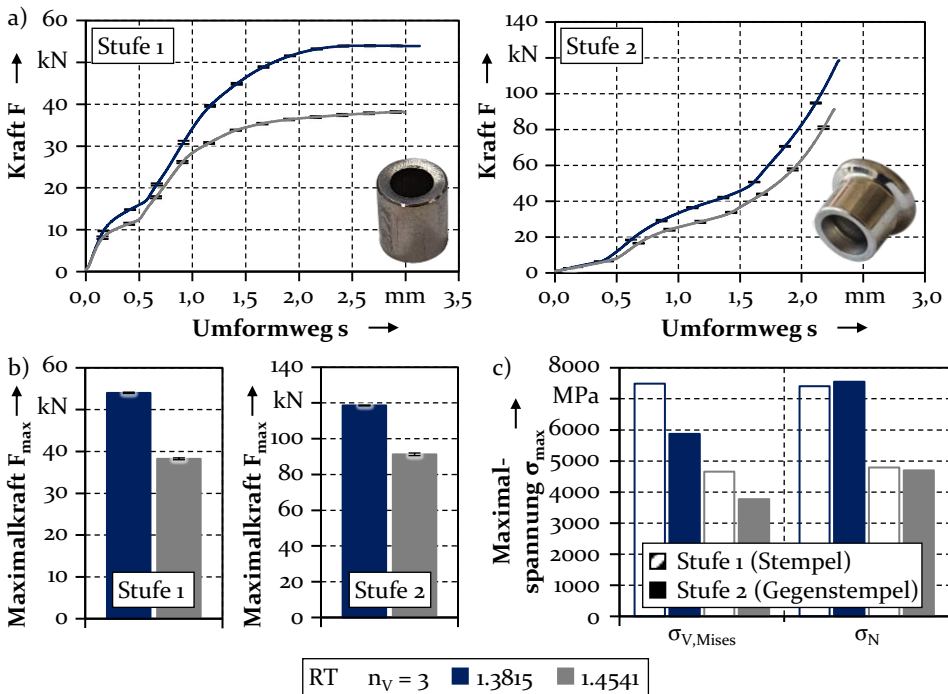


Bild 50: a) Experimentelle Kraft-Weg-Verläufe, b) experimentelle Maximalkräfte und c) numerisch ermittelte Spannungen im Werkzeug bei der Nietherstellung in Abhängigkeit vom eingesetzten Nietwerkstoff

In Stufe 2 ist ein Unterschied hinsichtlich des Beginns der Ausformung des Nietkopfes (vergleiche 2b in Bild 20) feststellbar, welcher für 1.4541 früher eintritt. Wie in Stufe 1 ist auch in Stufe 2 ein geringerer Umformweg am Prozessende (vergleiche 2c in Bild 20) notwendig, um Niete mit einer vergleichbaren Kopfdicke wie beim Einsatz von 1.3815 herzustellen. Die maßgebliche Ursache hierfür ist die unterschiedliche Kaltverfestigung der beiden Werkstoffe, was entsprechend den Ergebnissen der Werkstoffcharakterisierung anhand des um etwa 30 % geringeren Verfestigungsexponenten von 1.4541 im Vergleich zu 1.3815 ersichtlich wird.

Die Unterschiede in Bezug auf die mechanischen Eigenschaften der beiden Werkstoffe führen darüber hinaus zu Abweichungen der maximalen Prozesskräfte, welche in Bild 50 b) aufgeführt sind. Die Maximalkraft bei der Umformung von Näpfen aus 1.4541 in Stufe 1 beträgt $38,2 \text{ kN} \pm 0,1 \text{ kN}$ und ist somit um mehr als 29 % geringer als bei der Nutzung von 1.3815. In Stufe 2 wird beim Einsatz von 1.4541 eine Prozesskraft von $91,3 \text{ kN} \pm 0,7 \text{ kN}$ erreicht, was einer Reduzierung um etwa 23 % im Vergleich zu 1.3815 ent-

spricht. Die Verringerung der erforderlichen Umformkräfte für 1.4541 gegenüber den Umformkräften beim Einsatz des hochstickstofflegierten Stahls 1.3815 ist hauptsächlich durch die bessere Umformbarkeit von 1.4541 erklärbar, was sich in der geringeren Fließgrenze, der verringerten Kaltverfestigung und dem im Rahmen der Werkstoffcharakterisierung festgestellten, durchgehend geringeren Fließspannungsniveau widerspiegelt.

Der Einsatz unterschiedlicher Nietwerkstoffe hat dementsprechend auch einen Einfluss auf die Werkzeugbeanspruchung während der Nietherstellung. Die maximal auftretenden Spannungen im Werkzeug sind Bild 50 c) zu entnehmen. Die in Stufe 1 auftretende maximale von-Mises-Vergleichsspannung im Stempel von 4654 MPa beim Einsatz von 1.4541 ist um 38 % geringer als bei der Verwendung von 1.3815, die maximale Kontaktnormalspannung von 4794 MPa um 35 %. Bei der Umformung von 1.4541 in Stufe 2 beträgt der Maximalwert für die von-Mises-Vergleichsspannung 3771 MPa und für die Kontaktnormalspannung 4700 MPa, was einer Verringerung um etwa 36 % ($\sigma_{V,Mises}$) und 38 % (σ_N) entspricht. Die reduzierte Werkzeugbeanspruchung bei der Nietherstellung mit 1.4541 als Nietwerkstoff ist ebenso wie bei den Prozesskräften hauptsächlich auf die geringere Fließgrenze und Kaltverfestigung zurückzuführen.

Einfluss auf die Bauteileigenschaften

Neben dem werkstoffseitigen Einfluss auf den Umformprozess sind auch die Auswirkungen des Einsatzes unterschiedlicher Nietwerkstoffe auf die Bauteileigenschaften zu überprüfen. In Bild 51 sind die geometrischen Parameter der umgeformten Bauteile aus 1.3815 und 1.4541 gegenübergestellt. Sowohl die Restbodendicken der Nöpfe als auch die Kopfdicken der Niete weisen Unterschiede von maximal 0,01 mm auf. Um dies zu erreichen, muss der Stempelweg bei der Umformung von 1.4541 verringert werden, da bei gleichem Stempelweg wie beim Einsatz von 1.3815 eine geringere Restbodendicke sowie Kopfdicke erzielt werden würde. Dementsprechend werden die definierten Kriterien der Vergleichbarkeit für beide Umformstufen als erfüllt angenommen. Ein Einfluss unterschiedlicher Restbodendicken nach Stufe 1 auf die Umformung in Stufe 2 und die sich daraus ergebende Nietgeometrie ist somit auszuschließen. Es ergeben sich Napfhöhen von $5,66 \text{ mm} \pm 0,04 \text{ mm}$ (1.3815) und $5,71 \text{ mm} \pm 0,04 \text{ mm}$ (1.4541). Bei den geometrischen Parametern nach Stufe 1 sind demnach keine relevanten Unterschiede in Abhängigkeit vom Werkstoff feststellbar. Die Niete nach Stufe 2 weisen Nennlängen von $5,04 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ für den hochstickstofflegierten Stahl 1.3815 und $4,99 \text{ mm} \pm 0,03 \text{ mm}$ für den Edelstahl 1.4541 sowie

Kopfdurchmesser von $7,15 \text{ mm} \pm 0,04 \text{ mm}$ für den Einsatz von 1.3815 und $7,37 \text{ mm} \pm 0,01 \text{ mm}$ für die Verwendung von 1.4541 auf.

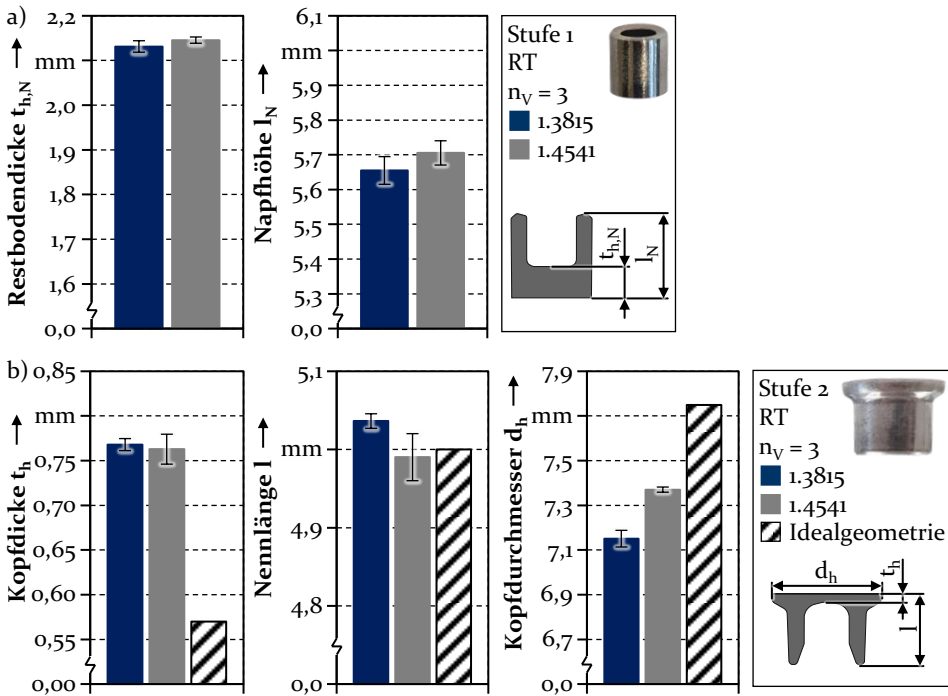


Bild 51: Geometrische Parameter der a) Näpfe nach Stufe 1 und b) Niete nach Stufe 2 in Abhängigkeit vom eingesetzten Nietwerkstoff

Für den Edelstahl 1.4541 wird dementsprechend bei einer vergleichbaren Kopfdicke tendenziell eine geringere Nennlänge, vor allem aber ein vergrößerter Kopfdurchmesser erreicht. Dies ist im Hinblick auf den Fügeprozess und die hierfür definierte Idealgeometrie vorteilhaft, da eine Vergrößerung des Kopfdurchmessers die Verbindungsfestigkeit günstig beeinflussen kann. Die unterschiedliche erreichte Nietgeometrie lässt sich mit dem Einfluss der mechanischen Werkstoffeigenschaften begründen. Durch das geringere Fließspannungsniveau sowie die geringere Kaltverfestigung bei der Umformung von 1.4541 wird eine verbesserte Ausformung der Niete erreicht. Dies gilt insbesondere für den Kopfdurchmesser, wie sich anhand des veränderten Werkstoffflusses (vergleiche Bild 49) zeigt, bei welchem beim Einsatz von 1.4541 größere Bereiche mit höherer Geschwindigkeit im äußeren Nietkopf auftreten.

Ein potentieller Einfluss des vergrößerten Kopfdurchmessers ist dementsprechend bei der Analyse der Niethärte vor allem im Kopfbereich zu be-

rücksichtigen. Die nach der Umformung erreichte Niethärte in Abhängigkeit vom eingesetzten Nietwerkstoff ist Bild 52 zu entnehmen. Es folgt der Vergleich der Niete aus dem Edelstahl 1.4541 mit den Nieten aus dem hochstickstofflegierten Stahl 1.3815 sowie die Überprüfung, ob die Niete aus 1.4541 ebenfalls die in Bild 7 dargestellten Grundanforderungen erfüllen.

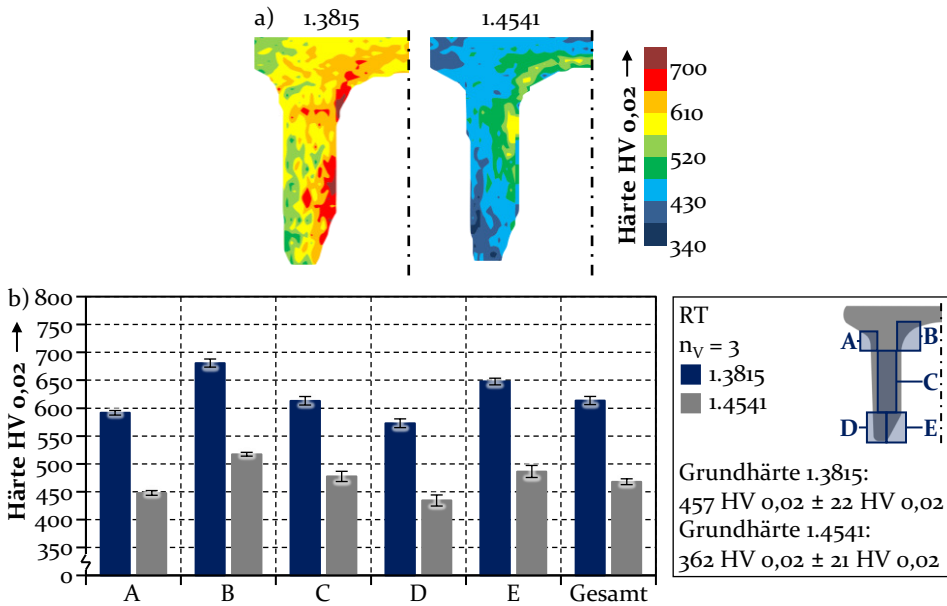


Bild 52: Härte von Nieten a) über den Bauteilquerschnitt und b) in ausgewählten Nietbereichen in Abhängigkeit vom Nietwerkstoff

Die Niete aus 1.4541 weisen eine Gesamthärte von $468 \text{ HV } 0,02 \pm 5 \text{ HV } 0,02$ auf, welche somit um 24 % geringer als bei den Nieten aus 1.3815 ist, obgleich eine verbesserte Ausformung in Bezug auf den vergrößerten Kopfdurchmesser erzielt wird. Die geringere Ausgangshärte in Kombination mit der geringeren Kaltverfestigung von 1.4541 stellt die Ursache hierfür dar. Dies bedeutet außerdem, dass der für die Gesamthärte definierte Mindestwert von 480 HV beim Einsatz von 1.4541 als Nietwerkstoff unterschritten wird. Im äußeren und inneren Übergangsbereich vom Nietschaft zum Nietkopf treten lokale Härtewerte von $448 \text{ HV } 0,02 \pm 4 \text{ HV } 0,02$ (A) und $517 \text{ HV } 0,02 \pm 3 \text{ HV } 0,02$ (B) auf, welche ebenso um 24 % geringer sind als bei den Nieten aus 1.3815. Der Nietschaft ist durch eine Härte von $478 \text{ HV } 0,02 \pm 9 \text{ HV } 0,02$ (C) gekennzeichnet, was einer Reduzierung um 22 % verglichen mit Nieten aus 1.3815 entspricht. Das Erreichen des definierten Mindestwerts von 480 HV ist somit in diesem Bereich nicht gewährleistet. Folglich ist beim Fügen von hochfestem Stahl mittels der Niete

aus 1.4541 eine übermäßige Stauchung des Nietschafts [13] oder ein Ausknicken des Schafts [67] zu erwarten. Im Nietfuß wird bei den Nieten aus 1.4541 mit 434 HV $0,02 \pm 10$ HV $0,02$ (D) und 486 HV $0,02 \pm 11$ HV $0,02$ (E) eine um 24 % (D) und 25 % (E) geringere Härte als bei den Nieten aus 1.3815 erzielt. Die Anforderung bezüglich der Kombination einer geringeren Härte im Bereich D mit einer höheren Härte im Bereich E, um das Aufspreizen und die Hinterschnittausbildung zu begünstigen, ist damit erfüllt. Allerdings ist nicht auszuschließen, dass die erreichte Härte zu gering ist, um sicherstellen zu können, dass die Nietschneide beim Durchschneiden des oberen Blechs intakt bleibt. Entsprechend der Härteanalyse ist somit das Härteniveau in allen Bereichen trotz der verbesserten Ausformung der Niete um mindestens 22 % geringer als bei den Nieten aus 1.3815. Da die Grundanforderung bezüglich der Mindesthärte von 480 HV bei der Verwendung von 1.4541 als Nietwerkstoff in den meisten Bereichen im Niet nicht erfüllt wird, ist davon auszugehen, dass die Eignung der Niete aus 1.4541 für das Fügen von hochfestem Stahl nicht gegeben ist, worauf bei der Analyse des Einsatzverhaltens der Niete in Kapitel 7 eingegangen wird.

Zusammenfassend werden durch die Untersuchungen unter Nutzung des Edelstahl 1.4541 und den Vergleich mit dem hochstickstofflegierten Stahl 1.3815 die unterschiedlichen Mechanismen, welche mit dem Einsatz verschiedener Nietwerkstoffe einhergehen, aufgezeigt. Der Umformprozess und die resultierenden Nieteigenschaften werden maßgeblich durch das werkstoffspezifische Zusammenwirken der Fließgrenze, der Ausgangshärte und des Verfestigungsverhaltens des Nietwerkstoffs beeinflusst. So werden beispielsweise aufgrund der ausgeprägten Mischkristallhärtung durch interstitiell gelöste Stickstoffatome höhere Härte- und Festigkeitswerte erzielt, wenn der hochstickstofflegierte Stahl 1.3815 statt des Edelstahl 1.4541 ohne interstitiell gelösten Stickstoff eingesetzt wird. In Abhängigkeit hiervon ergeben sich Unterschiede in Bezug auf den Stofffluss und die Verfestigung während der Umformung. Die Verfestigung spielt in diesem Fall eine besonders wichtige Rolle, da es sich um einen mehrstufigen Umformprozess handelt und somit die erzielte Vorverfestigung nach Stufe 1 einen wesentlichen Einfluss auf die Verfestigung in Stufe 2 hat.

6.5 Zusammenhänge zwischen prozessseitigen und werkstoffseitigen Einflussgrößen

Für eine umfassende Analyse der Einflüsse auf den Nietherstellprozess und die resultierenden Bauteileigenschaften ist das Zusammenwirken von prozessseitigen und werkstoffseitigen Einflussgrößen zu berücksichtigen. Auf

Basis der Werkstoffcharakterisierung ist davon auszugehen, dass maßgeblich verschiedene Umformtemperaturen in Kombination mit je nach Temperatur und eingesetztem Nietwerkstoff unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften zu einer Veränderung der Ergebnisgrößen in Bezug auf den Umformprozess und die Bauteileigenschaften führen. Zusammenhänge der Restbodendicke nach Stufe 1 und der geometrischen Schwankungen der Rohlinge mit den werkstoffseitigen Einflussgrößen werden ausgeschlossen. Es werden drei grundlegende Einflussketten identifiziert, welche sich voneinander separieren lassen und welche das Zusammenwirken prozesseitiger und werkstoffseitiger Einflussgrößen abbilden. Eine Übersicht über diese drei Einflussketten ist in Bild 53 gegeben. Aus den Untersuchungen zum Einfluss der Umformtemperatur auf den Nietherstellprozess geht hervor, dass die Prozesskräfte und die Werkzeugbeanspruchung von der Temperatur beeinflusst werden. Gleichzeitig sind die erreichten Prozesskräfte und die Werkzeugbeanspruchung davon abhängig, welcher Nietwerkstoff eingesetzt wird. Da zusätzlich eine Abhängigkeit der Fließgrenze und der Kaltverfestigung des genutzten Werkstoffs von der Umformtemperatur besteht, beeinflussen die temperaturabhängigen Werkstoffeigenschaften die Prozesskräfte und die Werkzeugbeanspruchung in unterschiedlichem Ausmaß, was durch Einflusskette I beschrieben wird.

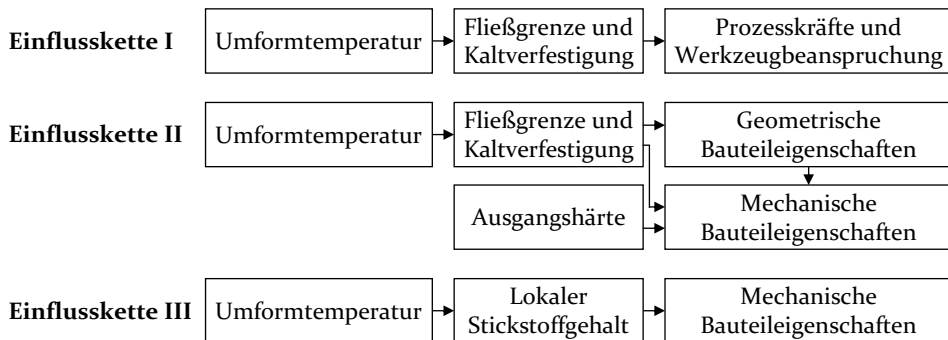


Bild 53: Abbildung der Zusammenhänge zwischen prozesseitigen und werkstoffseitigen Einflussgrößen anhand identifizierter Einflussketten

Dieses Zusammenwirken der Umformtemperatur und der Werkstoffeigenschaften beeinflusst nicht nur den Umformprozess, sondern auch die sich ergebenden geometrischen sowie mechanischen Bauteileigenschaften. Dabei ist auch die Ausgangshärte des Nietwerkstoffs einzubeziehen, obgleich für diese Einflussgröße keine Temperaturabhängigkeit vorliegt. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass sich die Werkstoffeigenschaften nicht nur direkt, sondern auch indirekt über eine Änderung der erreichten Bauteilgeometrie auf die mechanischen Bauteileigenschaften auswirken können.

Diese Zusammenhänge sind in Einflusskette II zusammengefasst. In der Literatur besteht darüber hinaus die Annahme, dass bei der Umformung hochstickstofflegierter Stähle eine temperaturinduzierte Stickstoffdiffusion aufgrund der Zunahme der Beweglichkeit der interstitiell gelösten Stickstoffatome bei erhöhten Temperaturen stattfindet [100]. Es wird davon ausgegangen, dass insbesondere im Temperaturbereich von 200 °C bis 600 °C infolgedessen ein Anheften von Stickstoff an Versetzungen erfolgt [101], was mit einem zusätzlichen Kraftaufwand für die Versetzungsbewegung verbunden ist und mit einer lokalen Verfestigung einhergehen kann. Hierauf basiert die identifizierte Einflusskette III. Daher werden bei unterschiedlichen Temperaturen umgeformte Niete aus 1.3815 mittels EDX-Analysen und Härtemessungen untersucht, um anhand der Korrelation des lokalen Stickstoffgehalts mit den lokalen mechanischen Bauteileigenschaften ein vertieftes Verständnis für die Vorgänge im Werkstoff aufzubauen.

Einflusskette I: Auswirkungen auf den Umformprozess

Um das Zusammenwirken der Umformtemperatur mit der Fließgrenze und der Kaltverfestigung und den davon abhängigen Einfluss auf die Prozesskräfte und die Werkzeugbeanspruchung zu untersuchen, erfolgt die Nietherstellung unter Nutzung des hochstickstofflegierten Stahls 1.3815 und des Edelstahl 1.4541 bei Raumtemperatur und bei 200 °C unter der Voraussetzung, dass für alle Bauteile eine vergleichbare Restbodendicke nach Stufe 1 und Kopfdicke nach Stufe 2 erreicht wird. Auf diese Weise können geometrische Unterschiede als Einflussfaktor ausgeschlossen und Veränderungen direkt der Temperaturabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften zugeordnet werden. Die in diesem Zusammenhang experimentell ermittelten maximalen Prozesskräfte sind in Bild 54 a) dargestellt.

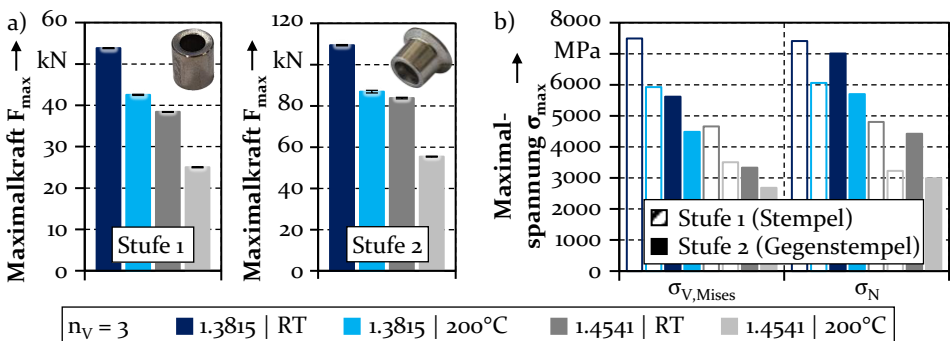


Bild 54: a) Experimentelle Maximalkräfte und b) numerisch ermittelte Spannungen im Werkzeug bei der Nietherstellung in Abhängigkeit vom Nietwerkstoff und von der Umformtemperatur

Beim Einsatz von 1.4541 wird bei 200 °C in Stufe 1 eine maximale Prozesskraft von $25,0 \text{ kN} \pm 0,1 \text{ kN}$ erreicht, womit die Kraft um 35% geringer ist als bei Raumtemperatur. Ähnlich hierzu ist bei der Umformung von 1.4541 in Stufe 2 bei 200 °C die Maximalkraft von $55,4 \text{ kN} \pm 0,2 \text{ kN}$ verglichen mit dem erreichten Kraftwert bei Raumtemperatur um 34 % reduziert. Bei der Verwendung von 1.3815 hingegen beträgt die Reduzierung der maximalen Prozesskraft 21 % je Stufe. Dies bedeutet, dass durch eine Erhöhung der Prozesstemperatur für beide Werkstoffe eine Kraftreduzierung erzielt werden kann, wobei dieser Effekt allerdings für 1.4541 stärker ausgeprägt ist als für 1.3815. Bei beiden Werkstoffen lässt sich die Kraftreduzierung maßgeblich auf die erleichterte Bewegung von Versetzungen infolge der Temperaturerhöhung [69] zurückführen, welche auch eine Verringerung der Fließspannung zur Folge hat [150]. Sowohl 1.3815 als auch 1.4541 weisen daher eine reduzierte Fließgrenze bei 200 °C im Vergleich zu Raumtemperatur auf. Beim Edelstahl 1.4541 trägt die verringerte Kaltverfestigung bei 200 °C zusätzlich zur Kraftreduzierung bei. Im Gegensatz hierzu liegt beim druckaufgestickten Stahl 1.3815 eine höhere Kaltverfestigung bei 200 °C vor. Dies kann durch das Anheften von Stickstoffatomen an die Versetzungen [101] infolge der temperaturinduzierten erhöhten Stickstoffdiffusion [100] bedingt sein. Die erhöhte Kaltverfestigung wirkt der Kraftreduzierung bei der Umformung von 1.3815 entgegen. Dies stellt einen Erklärungsansatz für die stärkere Ausprägung des Temperatureinflusses auf die Kraftreduzierung bei der Umformung von 1.4541 im Vergleich zu 1.3815 dar. Demnach ist festzuhalten, dass eine Abhängigkeit der maximalen Prozesskräfte vom Zusammenwirken aus der Umformtemperatur und den temperaturbedingten Werkstoffeigenschaften besteht.

Ähnliche Effekte sind in Bezug auf die während der Umformung auftretenden maximalen Spannungen im Werkzeug, welche in Bild 54 b) gegenübergestellt sind, erkennbar. Für 1.4541 wird in Stufe 1 bei 200 °C eine von-Mises-Vergleichsspannung von 3508 MPa und eine Kontaktnormalspannung von 3329 MPa erreicht. Dies entspricht einer Verringerung um 25 % ($\sigma_{V,Mises}$) und 33 % (σ_N) im Vergleich zur Umformung bei Raumtemperatur. Im Vergleich hierzu beträgt die temperaturbedingte Spannungsreduzierung bei der Verwendung von 1.3815 21 % ($\sigma_{V,Mises}$) und 18 % (σ_N). Demnach ist die erreichte Verringerung der Spannungen in Stufe 1 infolge der Temperaturerhöhung für 1.4541 vergleichsweise höher. In Stufe 2 treten bei der Umformung von 1.4541 bei 200 °C Maximalwerte der von-Mises-Vergleichsspannung von 2684 MPa und der Kontaktnormalspannung von 2988 MPa auf, was eine Reduzierung um 20 % ($\sigma_{V,Mises}$) und 32 % (σ_N) bedeutet. Für 1.3815 ist die Verringerung der von-Mises-Vergleichsspannung,

welche 21 % bei der Temperaturerhöhung von Raumtemperatur auf 200 °C beträgt, vergleichbar. Was die maximale Kontaktnormalspannung anbelangt, ist der Temperatureinfluss bei einer Spannungsreduzierung von 19 % geringer ausgeprägt als bei 1.4541. Demzufolge kann die Werkzeugbeanspruchung beim Einsatz beider Werkstoffe durch eine Temperaturerhöhung auf 200 °C reduziert werden, wobei der Temperatureinfluss wie bei den Prozesskräften auch vom Werkstoff und dessen temperaturbedingten mechanischen Eigenschaften abhängig ist.

Einflusskette II: Auswirkungen auf die geometrischen und mechanischen Bauteileigenschaften

Das Zusammenwirken der Umformtemperatur und der Werkstoffeigenschaften beeinflusst die Bauteilgeometrie, welche am Ende der Umformung erreicht wird, und in der Folge auch die resultierenden mechanischen Bauteileigenschaften. Zur Analyse der auftretenden Effekte wird bei der experimentellen Nietherstellung bei Raumtemperatur der Stempelweg je nach Werkstoff angepasst, sodass unabhängig vom Werkstoff eine vergleichbare Restbodendicke nach Stufe 1 und eine vergleichbare Kopfdicke nach Stufe 2 erreicht wird. Für die Umformung bei 200 °C hingegen wird derselbe Stempelweg je Werkstoff wie bei Raumtemperatur eingestellt, wodurch der Temperatureinfluss auf die geometrischen Parameter für beide Werkstoffe abgebildet wird. Die geometrischen Parameter in Abhängigkeit sowohl von der Umformtemperatur als auch vom Nietwerkstoff sind in Bild 55 aufgeführt. Für beide Werkstoffe ist durch eine Erhöhung der Prozesstemperatur eine Verringerung der Restbodendicke und eine Vergrößerung der Napfhöhe zu verzeichnen. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass sich bei den bei 200 °C umgeformten Näpfen aus 1.4541 ein Verhältnis der Napfhöhe zur Restbodendicke von 3,4 ergibt. Wie am Ende des Abschnitts zum Einfluss der Restbodendicke erläutert, treten beim Einsatz von Näpfen mit einem entsprechenden Verhältnis von 3,5 Stoffflussfehler in Form von rissähnlichen Spalten in den Nieten auf, was als kritisch für den Fügeprozess anzusehen ist. Diese Stoffflussfehler ergeben sich, wenn zu große Unterschiede in Bezug auf die lokalen Fließgeschwindigkeiten im inneren Übergangsbereich zwischen Nietkopf und Nietschaft vorliegen. Hieraus resultieren eine zunehmende Verfestigung und die Bildung lokaler Fließbehinderungen in diesem Übergangsbereich. Dies führt schließlich zu einer Verschiebung des Materials im Übergangsbereich entlang des Nietschafts, wodurch ein rissähnlicher Spalt entsteht. Im Gegensatz hierzu weisen die analysierten Niete aus 1.4541, für welche Näpfe mit einem Verhältnis der Napfhöhe zur Restbodendicke von 3,4 verwendet wurden, keine derartigen Stoffflussfehler auf. Dies untermauert, dass bei der Herstellung der

Näpfe ein Verhältnis der Napfhöhe zur Restbodendicke von 3,5 als Grenze für das Auftreten von Stoffflussfehlern festzulegen ist.

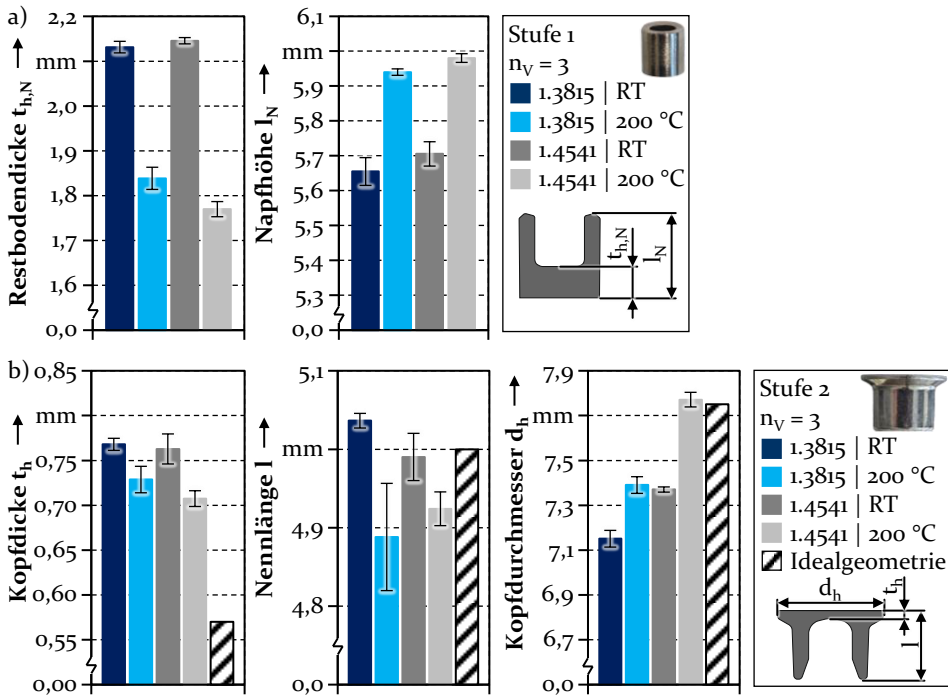


Bild 55: Geometrische Parameter der a) Näpfe nach Stufe 1 und b) Nieten nach Stufe 2 in Abhängigkeit vom Nietwerkstoff und von der Umformtemperatur

In Stufe 2 geht eine Temperaturerhöhung mit einer Verringerung der Kopfdicke und der Nennlänge sowie einer Vergrößerung des Kopfdurchmessers einher. Prinzipiell ist der Temperatureinfluss auf die geometrischen Parameter demnach für beide Werkstoffe vergleichbar. Bei den Näpfen zeigt sich der wesentliche Unterschied in Bezug auf den Temperatureinfluss bei der Restbodendicke. Während für 1.4541 bei 200 °C eine um 0,38 mm geringere Restbodendicke erreicht wird, wird die Restbodendicke beim Einsatz von 1.3815 infolge der Temperaturerhöhung um 0,29 mm reduziert. Bei den Nieten ergibt sich der größte Unterschied für den Kopfdurchmesser. Bei der Nutzung von 1.4541 liegt nach der Umformung bei 200 °C ein um 0,40 mm vergrößerter Kopfdurchmesser im Vergleich zu Raumtemperatur vor, während die Vergrößerung des Durchmessers bei 1.3815 infolge des Temperatureinflusses 0,24 mm beträgt. Die Reduzierung des Fließspannungsniveaus infolge der Temperaturerhöhung ist für 1.4541 stärker ausgeprägt. Die Verringerung der Fließgrenze bei 200 °C ist hingegen für 1.3815 höher. Ausschlaggebend ist in diesem Fall die reduzierte Kaltverfestigung

von 1.4541 bei 200 °C, welcher eine gesteigerte Kaltverfestigung von 1.3815 bei 200 °C im Vergleich zu Raumtemperatur entgegensteht. Daher lassen sich die Unterschiede bezüglich des Temperatureinflusses auf die geometrischen Bauteileigenschaften maßgeblich auf die unterschiedliche Verfestigung in Abhängigkeit vom Werkstoff zurückführen. Wie stark der Temperatureinfluss auf die erreichbare Bauteilgeometrie ausgeprägt ist, hängt daher auch von den temperaturbedingten mechanischen Werkstoffeigenschaften ab. Neben den beschriebenen Änderungen der geometrischen Parameter in Abhängigkeit von der Umformtemperatur und dem Nietwerkstoff kann auch eine Veränderung der erreichten mechanischen Nieteigenschaften auftreten, wie dem nachfolgenden Bild 56 zu entnehmen ist.

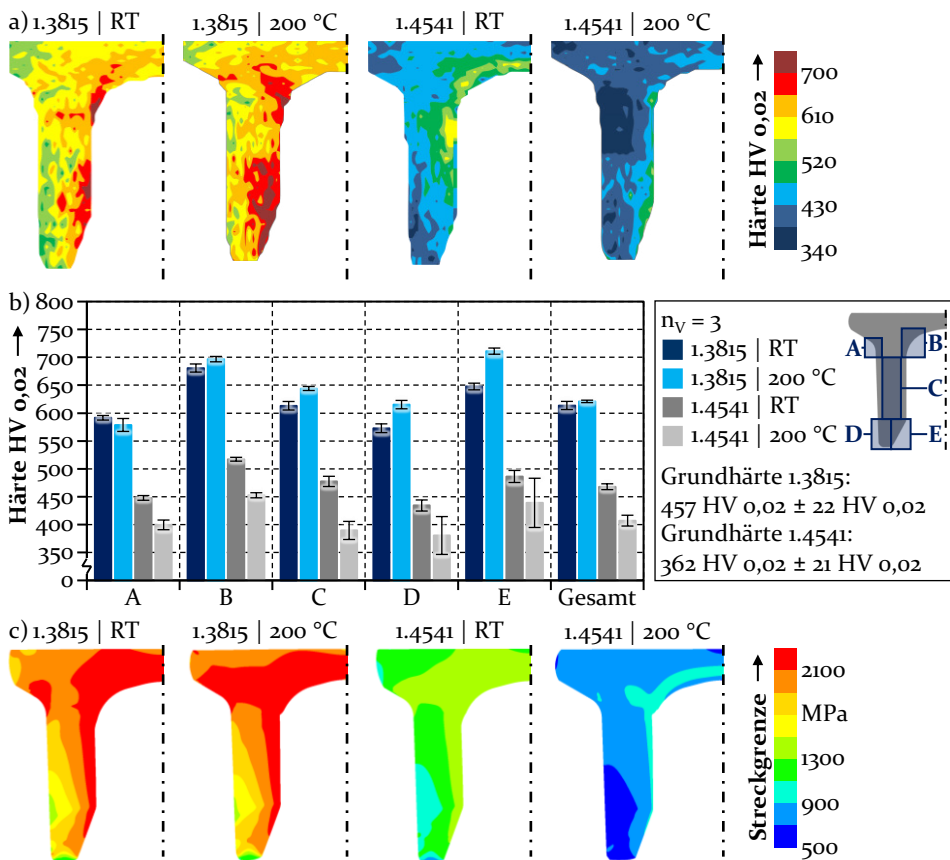


Bild 56: Mechanische Nieteigenschaften in Abhängigkeit vom Nietwerkstoff und von der Umformtemperatur: a) Experimentell ermittelte Härte, b) experimentell ermittelte Härte in ausgewählten Nietbereichen, c) numerisch ermittelte Streckgrenze

Die Gesamthärte der bei 200 °C umgeformten Niete aus 1.4541 liegt mit 407 HV $0,02 \pm 10$ HV $0,02$ um 13 % unter dem bei Raumtemperatur erreichten Härteniveau, obwohl die Niete entsprechend den in Bild 55 dargestellten Ergebnissen einen größeren Kopfdurchmesser und eine geringere Kopfdicke aufweisen. Im Gegensatz hierzu liegen für die Gesamthärte der Niete aus 1.3815 unabhängig von der Temperatur vergleichbare Werte vor. In den beiden Übergangsbereichen A und B vom Nietschaft zum Nietkopf ist die lokale Härte bei den Nieten aus 1.4541 nach der Umformung bei 200 °C im Vergleich zu Raumtemperatur um 11 % (A) und 13 % (B) reduziert. Bei den Nieten aus 1.3815 sind in diesen Übergangsbereichen lediglich geringfügige temperaturbedingte Änderungen um bis zu 2 % festzustellen. Des Weiteren führt die Temperaturerhöhung bei der Verwendung von 1.4541 als Nietwerkstoff zu einer Verringerung der lokalen Härte im Nietschaft und im Nietfuß um 18 % (C), 12 % (D) und 10 % (E), während bei den Nieten aus 1.3815 sogar eine Steigerung der lokalen Härte in diesen Bereichen nach der Umformung bei 200 °C zu verzeichnen ist. Auch die Streckgrenze bei den Nieten aus 1.4541 nach der Umformung bei 200 °C mit Maximalwerten von weniger als 1100 MPa geringer als nach der Umformung bei Raumtemperatur, bei welcher Werte über 1300 MPa erreicht werden, wohingegen bei den Nieten aus 1.3815 keine Reduzierung der Streckgrenze auftritt. Somit hat die Erhöhung der Umformtemperatur bei der Nietherstellung unter Nutzung von 1.4541 eine Reduzierung des Härte- und Festigkeitsniveaus zur Folge, obgleich eine verbesserte Ausformung der Niete mit einem größeren Kopfdurchmesser und einer geringeren Kopfdicke erreicht wird. Dementsprechend ist der Temperatureffekt in Bezug auf die mechanischen Nieteigenschaften je nach eingesetztem Nietwerkstoff unterschiedlich, wobei die temperaturabhängige Kaltverfestigung des Werkstoffs entscheidend ist. Aufgrund der bei 200 °C im Vergleich zu Raumtemperatur verringerten Kaltverfestigung von 1.4541 resultiert aus der Temperaturerhöhung eine Reduzierung der gesamten Niethärte und der lokalen Härte in den analysierten Bereichen. Die verglichen mit 1.3815 verringerte Ausgangshärte von 1.4541 trägt zusätzlich dazu bei, dass ein geringeres Härteniveau erreicht wird und der Temperatureffekt nicht kompensiert werden kann. Bei der Verwendung von 1.3815 führt die bei 200 °C im Vergleich zu Raumtemperatur gesteigerte Kaltverfestigung dazu, dass vergleichbare oder höhere Härtewerte erzielt werden. Es ist davon auszugehen, dass die Erhöhung der Prozesstemperatur bei der Herstellung von Nieten aus 1.4541 nicht zum Erreichen eines verbesserten Fügeergebnisses beiträgt, während die temperaturbedingten Veränderungen der mechanischen Eigenschaften der Niete aus 1.3815 als positiv für das Fügen bewertet werden. Bei der Wahl der Umformtemperatur für die Nietherstellung ist

folglich das Zusammenwirken der Temperatur und der mechanischen Werkstoffeigenschaften zu berücksichtigen.

Da bei den zuvor beschriebenen Untersuchungen eine zusätzliche Beeinflussung der mechanischen Bauteileigenschaften durch die Änderung der geometrischen Parameter nicht auszuschließen ist, werden weiterführende Versuche zur experimentellen Nietherstellung durchgeführt. Dadurch dass hierbei Bauteile mit einer vergleichbaren Restbodendicke nach Stufe 1 und Kopfdicke nach Stufe 2 unabhängig von der Umformtemperatur und vom Werkstoff hergestellt werden, ist eine Abgrenzung vom Einfluss der Bauteilgeometrie gewährleistet. In diesem Zusammenhang werden zudem unterschiedliche Varianten bezüglich der Temperaturkombination aus Raumtemperatur und 200 °C für die beiden Umformstufen entsprechend Tabelle 10 gewählt. Ein Überblick über die in Abhängigkeit von der Temperaturkombination und dem Nietwerkstoff erzielte Niethärte ist in nachfolgendem Bild 57 gegeben. Die lokalen Härtewerte für die ausgewählten Nietbereiche A bis E sind für die Niete aus 1.3815 aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht explizit aufgeführt. Für den Vergleich zwischen 1.3815 und 1.4541 ist Bild 38 hinzuzuziehen. Bei der Gesamthärte der Niete aus 1.4541 zeigt sich, dass die Reduzierung des Härteniveaus im Vergleich zur Umformung bei Raumtemperatur geringer ist, wenn nur eine der beiden Umformstufen statt beide bei 200 °C durchgeführt wird. Für die Variante IV wird sogar eine von der Variante I um lediglich 1 % abweichende Gesamthärte von $466 \text{ HV } 0,02 \pm 2 \text{ HV } 0,02$ erreicht. Auch in den ausgewählten Nietbereichen A bis E gilt, dass im Vergleich zur Variante III eine Steigerung der Härte erzielt wird, wenn mindestens eine der beiden Umformstufen bei Raumtemperatur erfolgt. Die erreichte Streckgrenze der Niete ist nicht explizit in Bild 57 dargestellt, da die Ergebnisse für die Varianten I und II vergleichbar mit dem Ergebnis für den bei Raumtemperatur umgeformten Niet in Bild 56 sind, während die Ergebnisse für die Varianten III und IV kaum Abweichungen vom Ergebnis für den bei 200 °C umgeformten Niet aufweisen. Ein Einfluss der Temperatur auf die Streckgrenze ist demnach nicht bei allen untersuchten Temperaturkombinationen, sondern nur bei einer Änderung der Umformtemperatur in Stufe 2 erkennbar. Dies unterstreicht erneut die Bedeutung der Wahl der Umformtemperatur in Stufe 2. Da für alle Varianten unabhängig von der Temperaturkombination durch Anpassung des Stempelwegs das Erreichen einer vergleichbaren Kopfdicke der Niete sichergestellt ist, kann der potentielle Einfluss unterschiedlicher geometrischer Parameter ausgeschlossen werden. Die Änderungen der mechanischen Eigenschaften sind somit dem Temperatureinfluss zuordenbar.

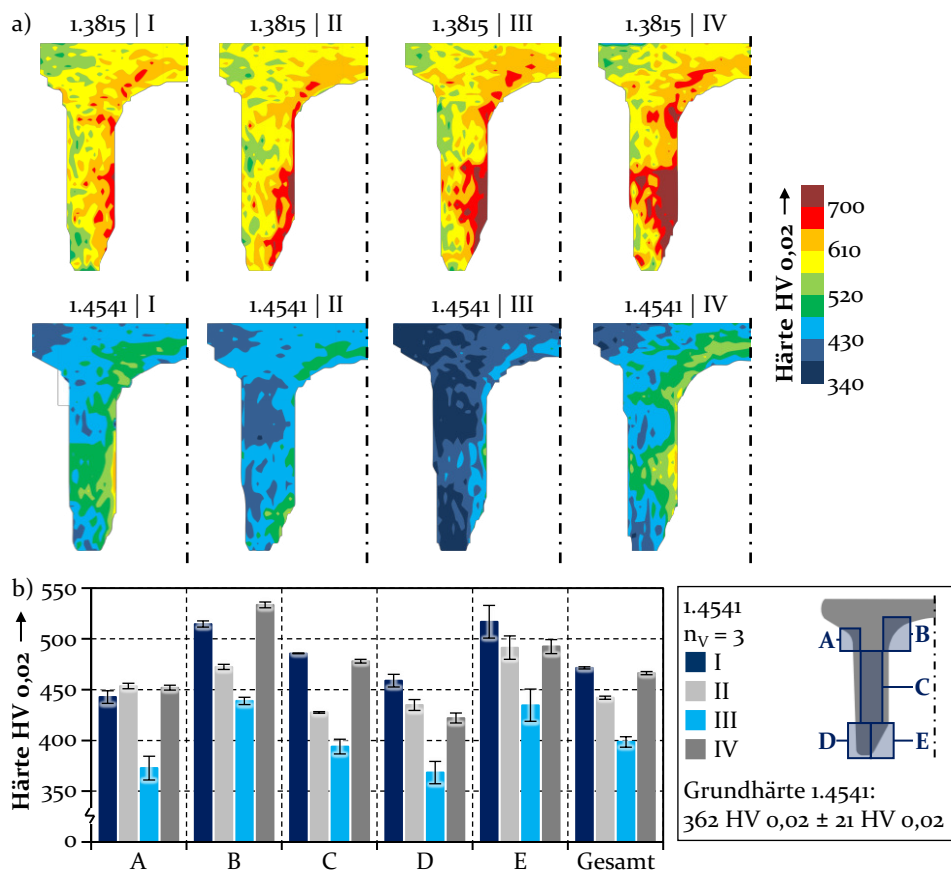


Bild 57: Experimentell ermittelte Härte in Abhängigkeit vom Nietwerkstoff und von den gewählten Varianten bezüglich der Temperaturkombination: a) Härte im Bauteilquerschnitt, b) Härte in ausgewählten Nietbereichen

Anhand des Vergleichs der Ergebnisse für 1.4541 mit den in Bild 38 dargestellten Ergebnissen für 1.3815 wird erkennbar, dass die Ausprägung des Temperatureinflusses auf die mechanischen Nieteigenschaften werkstoffabhängig ist. Aufgrund der bei 200 °C im Vergleich zu Raumtemperatur gesteigerten Kaltverfestigung von 1.3815 führt die Temperaturerhöhung insbesondere in Stufe 2 in fast allen Nietbereichen zu einer Steigerung der Härte. Dies trifft für den Einsatz von 1.4541 als Nietwerkstoff nicht zu, weil die Kaltverfestigung bei 200 °C im Gegensatz zu Raumtemperatur geringer ist. Allerdings ist festzuhalten, dass im Fall einer bei erhöhter Temperatur verringerten Kaltverfestigung die mit einer Erhöhung der Umformtemperatur verbundene Reduzierung der Härte teilweise kompensiert werden kann, wenn eine der beiden Umformstufen bei Raumtemperatur erfolgt. Sollten die Anforderungen in Bezug auf die Mindesthärte, anders als beim

hier untersuchten Einsatz von 1.4541, erfüllt sein, kann diese Erkenntnis genutzt werden, um durch eine Temperaturerhöhung in Stufe 2 die erforderliche Umformkraft zu reduzieren, ohne dass hieraus ein Unterschreiten der geforderten Mindesthärte resultiert.

Einflusskette III: Auswirkungen auf die mechanischen Bauteileigenschaften

Anhand der Gegenüberstellung von Ergebnissen der EDX-Flächenanalysen in ausgewählten Bereichen und Härtemessungen, wie in Bild 58 gezeigt, werden Zusammenhänge zwischen dem lokalen Stickstoffgehalt und der lokalen Härte abgeleitet. Zur Berücksichtigung der temperaturbedingten Diffusionsvorgänge im Werkstoff werden verschiedene Niete aus 1.3815, welche in Stufe 2 einerseits bei Raumtemperatur und andererseits bei 200 °C umgeformt werden, untersucht. Bei der Herstellung der hierfür genutzten Niete wird Stufe 1 bei Raumtemperatur durchgeführt, um dieselben Ausgangsbedingungen für Stufe 2 zu schaffen und einen Einfluss der in Stufe 1 gewählten Temperatur auf die Messergebnisse auszuschließen. Da die Detektion von Stickstoff mittels EDX-Analyse mit einer großen Messunsicherheit behaftet ist und damit keine ausreichende Genauigkeit für eine quantitative Evaluierung sichergestellt ist, erfolgt eine qualitative Bewertung der Messergebnisse.

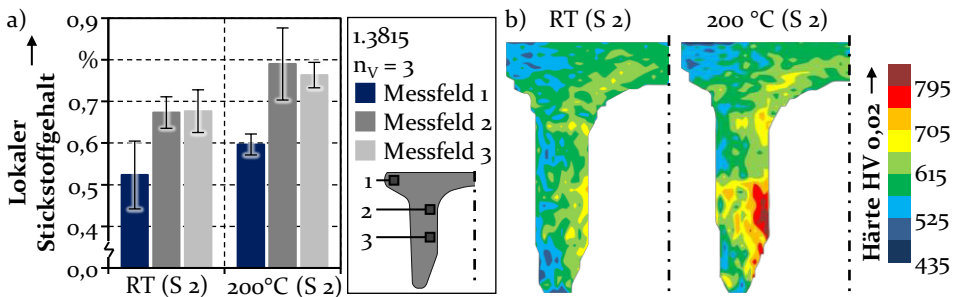


Bild 58: Korrelation von a) lokalem Stickstoffgehalt und b) Härte von bei unterschiedlichen Temperaturen umgeformten Nieten aus 1.3815

Für das Messfeld 1, welches in einem Bereich mit vergleichsweise geringer lokaler Härte im äußeren Bereich des Nietkopfs liegt, wird für beide Nietvarianten der jeweils geringste lokale Stickstoffgehalt gemessen. Die Messfelder 2 und 3 hingegen sind im Innenbereich des Nietschafts angesiedelt, in welchem für beide Nietvarianten die höchsten Härtewerte erreicht werden. Der in diesen Bereichen detektierte lokale Stickstoffgehalt überschreitet die Messwerte für das Messfeld 1. Dementsprechend ist eine grundsätzliche Korrelation des lokalen Stickstoffgehalts und der lokalen Härte erkennbar. Ein höherer lokaler Stickstoffgehalt führt zu einer höheren

lokalen Verfestigung und resultiert damit in höheren lokalen Härtewerten. Des Weiteren ist festzustellen, dass die ermittelten Werte je Messfeld bei den bei 200 °C umgeformten Nieten tendenziell höher sind als bei den bei Raumtemperatur umgeformten Nieten. Dies spiegelt sich in den infolge der Umformung bei 200 °C erreichten höheren Härtewerten vor allem im Nietenschaft wider. Diese Erkenntnisse untermauern die aus der Literatur bekannten Thesen, dass bei erhöhter Temperatur eine verstärkte Diffusion der Stickstoffatome stattfindet [100] und dass sich die diffundierten Stickstoffatome an Versetzungen anheften [101], wodurch die erhöhte Verfestigung bei erhöhter Temperatur erklärbar ist.

6.6 Zusammenfassende Bewertung

Anhand der vorgestellten Untersuchungen konnte die grundsätzliche Prozessierbarkeit von hochstickstofflegiertem Stahl für die Verwendung als Nietwerkstoff nachgewiesen werden. Die Untersuchung prozesseitiger und werkstoffseitiger Einflüsse auf den Umformprozess und die resultierenden Bauteileigenschaften basiert auf der Kombination aus verschiedenen experimentellen und numerischen Analysen. Eine grundlegende Übersicht der im Rahmen der Untersuchungen ermittelten Zusammenhänge ist in Bild 59 gegeben.

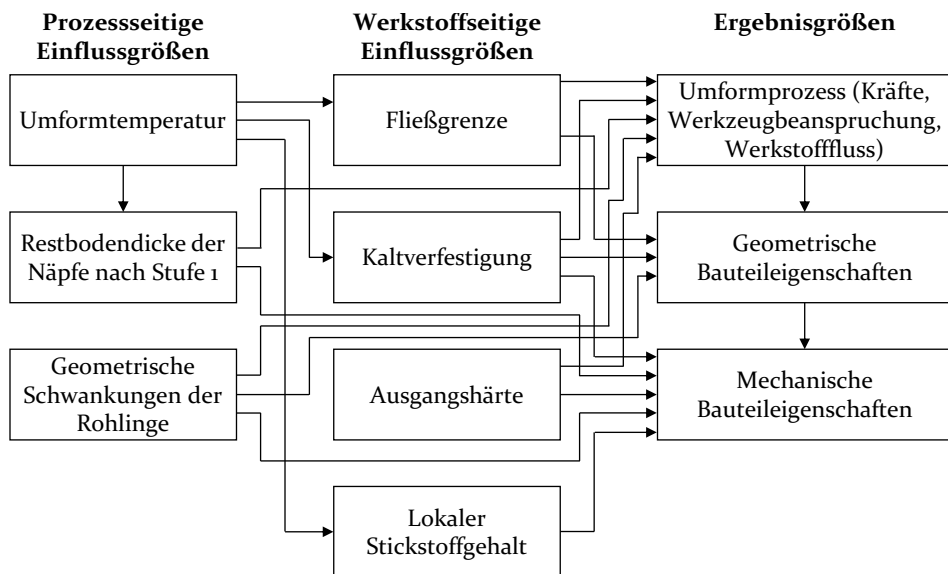


Bild 59: Identifizierte Einflüsse auf die Ergebnisgrößen bei der Nietherstellung

Unter den prozesseitigen Einflussgrößen tritt ein Einfluss der Umformtemperatur auf die resultierende Restbodendicke der Näpfe nach Stufe 1 auf, wobei eine Temperaturerhöhung zu einer Verringerung der Restbodendicke bei gleichem Stempelweg führt. Die gezielte Adaption der Restbodendicke durch die Eliminierung des Temperatureinflusses wird durch die erarbeitete analytisch basierte Methode zur Anpassung des Stempelwegs ermöglicht. Zudem beeinflusst die Temperatur einen Teil der werkstoffseitigen Einflussgrößen, wie anhand der im vorhergehenden Abschnitt dargestellten Einflussketten beschrieben. Vor dem Hintergrund der hohen Werkzeugbeanspruchung bei der Umformung hochstickstofflegierter Stähle sind die Einflüsse auf die Prozesskräfte und die Spannungen im Werkzeug von hoher Relevanz. Die Kenntnis der Einflüsse ist für die Prozessauslegung und Prozesskontrolle zur Sicherstellung der Machbarkeit nutzbar. Eine Zusammenfassung und Bewertung der Auswirkungen auf den Umformprozess ist Bild 60 zu entnehmen.

			Ergebnisgröße					
			Prozesskraft S 1		Werkzeugbeanspruchung S 1		Prozesskraft S 2	
			$F_{\max}$	$\sigma_{V,Mises,max}$	$\sigma_{N,max}$	$F_{\max}$	$\sigma_{V,Mises,max}$	$\sigma_{N,max}$
Einflussgröße	Prozessseitig	T	↑	↓	↓	↓	↓	↓
		$t_{h,N}$	↓	→	→	↓	↗/*	↗/*
		$V_{Rohling}$	↑	→	→	↑	↑	↑
	Werkstoffseitig	$R_{po,2}$	↓	↓	↓	↓	↓	↓
		n	↓	↓	↓	↓	↓	↓
		Ausgangshärte	↓	↓	↓	↓	↓	↓

↑ Steigerung ↓ Reduzierung → Keine Änderung * keine eindeutige
 ■ Positiv ■ Negativ ■ Neutral Abhängigkeit identifizierbar

Bild 60: Bewertung der ermittelten Einflüsse auf den Umformprozess

Die Umformtemperatur stellt den Haupteinflussfaktor unter den prozesseitigen Einflussgrößen dar. Durch die Erhöhung der Prozesstemperatur lässt sich im Allgemeinen eine Reduzierung der erforderlichen Prozesskräfte und der Werkzeugbeanspruchung erzielen. Wie stark die Temperatureffekte ausgeprägt sind, hängt von der Temperaturabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften des eingesetzten Nietwerkstoffs ab. Bei der Verwendung von hochverfestigenden Werkstoffen wie hochstickstofflegierten Stählen als Nietwerkstoff besteht eine Herausforderung in Bezug auf die hohen auftretenden Spannungen im Umformwerkzeug. In diesem Zusam-

menhang kann die Temperaturerhöhung zu einer Verbesserung der Bauteilumformung, welche aufgrund der Werkzeugbeanspruchbarkeit eingeschränkt ist, beitragen. Im industriellen Umfeld sollte ein besonderes Augenmerk auf dem Durchmesser des eingesetzten Drahts und der hierfür festgelegten Toleranz liegen, um sicherzustellen, dass die Werkzeugbeanspruchbarkeit nicht überschritten wird, da sich die Beanspruchung mit zunehmendem Rohlingvolumen erhöht.

Des Weiteren liegen auch auf die erreichten Bauteileigenschaften Einflüsse vor, deren Einordnung anhand von Bild 61 dargestellt ist. Aufgrund des begünstigten Werkstoffflusses und der verbesserten Umformbarkeit bei erhöhter Temperatur, kann eine Temperaturerhöhung unabhängig vom eingesetzten Nietwerkstoff für die Verbesserung der Ausformung der Niete genutzt werden. Durch die Kombination aus Umformtemperatur und Werkstoffeigenschaften werden darüber hinaus die mechanischen Nieteigenschaften in unterschiedlicher Weise beeinflusst. Die Kenntnis der Temperaturabhängigkeit der Werkstoffeigenschaften ist daher von großer Bedeutung, um die Nieteigenschaften gezielt steigern oder verringern zu können. In Bezug auf die Durchmesser-toleranzen des im industriellen Umfeld verwendeten Drahts ist relevant, dass die Veränderung des Rohlingvolumens sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf die erreichte Nietgeometrie hat. Es gilt daher zu prüfen, ob im Hinblick auf die Verwendung der Niete das Risiko eines Bruchs des matrizenseitigen Blechs aufgrund des zu geringen Nietenchaftvolumens infolge einer erhöhten Kopfdicke oder das Risiko einer Reduzierung der Verbindungsfestigkeit infolge eines verringerten Kopfdurchmessers höher einzustufen ist.

			Ergebnisgröße								
			Nietgeometrie			Nieteigenschaften			Nietfestigkeit		
			t_h	l	d_h	Kopf *	Schaft	Fuß	Kopf *	Schaft	Fuß
Einflussgröße	Prozess-seitig	T	↑	↓	→	↑	↑/↓ ^①	↑/↓ ^②	↑/↓ ^②	↑/↓ ^②	↑/↓ ^②
		$t_{h,N}$	↓	→	→	→	→	→	→	→	→
		$V_{Rohling}$	↑	↑	↑	→	→	→	→	→	→
	Werkstoff-seitig	$R_{p0,2}$	↓	↓	→	→	→	→	↓	↓	↓
		n	↓	↓	→	↓	↓	↓	↓	↓	↓
		Ausgangshärte	↓	→	→	↓	↓	↓	→	→	→

↑ Steigerung ↓ Reduzierung → Keine Änderung * mit Übergang zum Schaft
 ↑ Positiv ↓ Negativ → Neutral ① wenn T ↑ ⇒ n ↑ ② wenn T ↑ ⇒ n ↓

Bild 61: Bewertung der ermittelten Einflüsse auf die Bauteileigenschaften

Für die Temperatureffekte in Bezug auf die Umformung und die Nieteigenschaften ist die Temperatur in Stufe 2 ausschlaggebend. Demnach kann eine Temperaturerhöhung zur Reduzierung der Prozesskräfte und Werkzeugbeanspruchung, Verbesserung der Ausformung und Veränderung der mechanischen Nieteigenschaften im Prozess gezielt eingesetzt werden. Da diese Effekte zudem bereits bei leicht erhöhten Temperaturen bis 200 °C auftreten, wird durch die zielgerichtete Temperaturführung nach wie vor eine bessere Energiebilanz des Nietherstellprozesses erreicht als mit der bislang notwendigen Nachbehandlung durch Vergüten und Beschichten.

Im Zusammenhang mit den prozessseitigen Einflussgrößen werden drei Prozessgrenzen abgeleitet, welche in Bild 62 schematisch dargestellt sind. Bei einer Prozesstemperatur von 300 °C wird die Oberflächenqualität der Aktivteile und Bauteile innerhalb weniger Hubzahlen aufgrund der erhöhten Reibung reduziert. Beim Einsatz von Näpfen, bei welchen das Verhältnis der Napfhöhe zur Restbodendicke von 3,5 überschritten wird, treten im Übergangsbereich vom Nietkopf zum Nietschaft Stoffflussfehler in Form von rissähnlichen Spalten auf. Diese Stoffflussfehler entstehen durch die Verschiebung des Materials im Übergangsbereich aufgrund der hohen lokalen Verfestigung infolge großer Unterschiede der lokalen Fließgeschwindigkeiten. Derartige rissähnliche Spalte im Übergangsbereich des Nietkopfes zum Nietschaft sind als kritisch einzustufen, da sie die Rissinitiierung beim Fügen oder beim Einsatz der Fügeverbindung begünstigen können. Ferner besteht bei einem zu großen Spiel zwischen Matrize und Rohling ab 0,2 mm ein erhöhtes Risiko für Werkzeugversagen in Stufe 2 aufgrund der durch die mangelnde Konzentrizität der Näpfe hervorgerufenen ungleichmäßigen Werkzeugbeanspruchung.

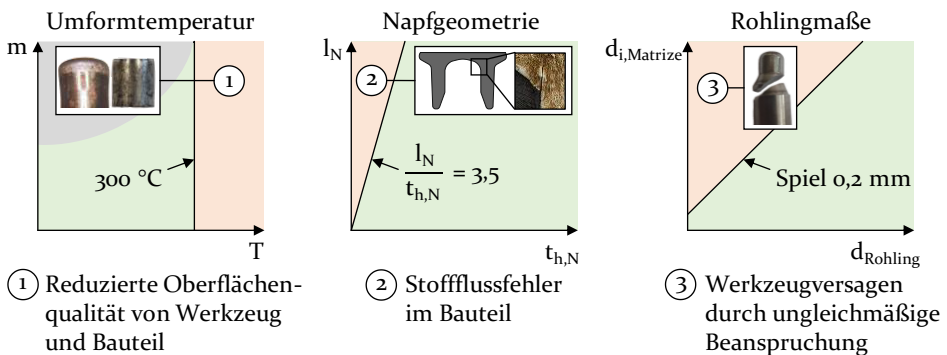


Bild 62: Identifizierte Prozessgrenzen für die untersuchten prozessseitigen Einflussgrößen

Durch die Erarbeitung der Zusammenhänge wurde ein grundlegendes Prozessverständnis für die Herstellung von Halbhohlstanznieten aus hochverfestigenden Werkstoffen erzielt. Es konnte gezeigt werden, dass eine Beeinflussung der lokalen Nieteigenschaften durch die Anpassung der Umformtemperatur und die Wahl des Nietwerkstoffs unter Berücksichtigung der Ausgangshärte und Kaltverfestigung möglich ist. Die erarbeiteten Erkenntnisse bilden somit eine wichtige Grundlage im Hinblick auf die Herstellung von Nieten mit anforderungsgerecht angepassten Eigenschaften.

7 Einsatzverhalten der Nietelemente

Der Nachweis der Eignung der neuartigen Niete für das Fügen insbesondere von hochfestem Stahl ist eine zwingende Voraussetzung, um das Potential der Herstellung von Nieten mit gradierten mechanischen Eigenschaften für den Einsatz beim Fügen moderner Hochleistungswerkstoffe zu belegen. Als Anforderung an die Niete wurde festgelegt, dass die Fügbarkeit von zwei unterschiedlichen Materialkombinationen aus dem hochfesten Dualphasenstahl HCT780X und der Aluminiumlegierung EN AW-5083 jeweils mit einer Blechdicke von 1,5 mm unter Nutzung der neuen Niete gegeben sein soll, wobei der hochfeste Stahl auf der Matrizen­seite angeordnet wird, was nach wie vor eine große Herausforderung für das Fügen darstellt. Die mechanischen Eigenschaften der Fügepartner sind Tabelle 2 zu entnehmen. Die Materialkombination mit sowohl stempel- als auch matrizen­seitig eingesetztem HCT780X wird im Folgenden als Materialkombination 1 bezeichnet. Materialkombination 2 ist durch den Einsatz von EN AW-5083 auf der Stempelseite und HCT780X auf der Matrizen­seite gekennzeichnet.

Zur Überprüfung der grundsätzlichen Eignung der Niete für das Fügen wurden experimentelle Setzversuche am Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik der Universität Paderborn durchgeführt [124]. Für die Setzversuche wurden mithilfe des neuartigen Nietherstellprozesses bei Raumtemperatur umgeformte Niete aus dem hochstickstofflegierten Stahl 1.3815 sowie dem Edelstahl 1.4541 verwendet. Bei der Nietherstellung wurden Rohlinge mit einem Durchmesser von 5,20 mm und einer Höhe von 4,72 mm entsprechend dem Volumen von Nieten der Idealgeometrie eingesetzt. Die Restbodendicke der für Stufe 2 genutzten Näpfe nach Stufe 1 betrug 2,1 mm. Die anhand der experimentellen Setzversuche erhaltenen Querschliffe und ermittelten Verbindungskennwerte sind in Bild 63 dargestellt. Um die Verbindungsbildung zu bewerten, wurde die Herstellung von Fügeverbindungen mit handelsüblichen Nieten als Vergleich herangezogen. Die Auswahl von für die Materialkombinationen geeigneten konventionellen Nieten erfolgte auf Basis einer experimentellen Bemusterung, weshalb für Materialkombination 1 ein Niet vom Typ P 5x5 SK H4 Almac® und für Materialkombination 2 ein Niet vom Typ HD2 5x4,5 SK H4 Almac® als Referenz verwendet wird [25].

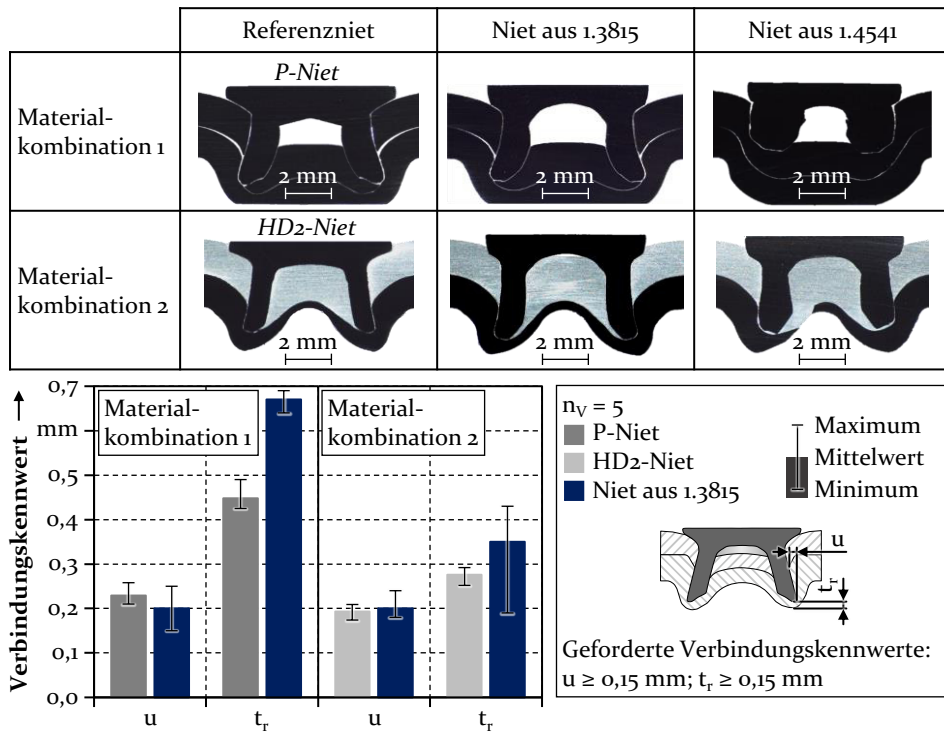


Bild 63: Querschliffe und Verbindungskennwerte nach [124] und [160]

Anhand der Untersuchung der Querschliffe zeigt sich, dass mit Nieten aus 1.3815 für beide Materialkombinationen defektfreie und qualitätsgerechte Fügeverbindungen herstellbar sind, für welche die gängigen Qualitätskriterien für die Verbindungskennwerte durch das Erreichen eines Hinterschnitts und einer Restbodendicke von mehr als 0,15 mm erfüllt sind [124]. Während bei den P-Nieten anhand der Querschliffe Risse beim Übergang vom Nietschaft zum Nietkopf detektiert werden, weisen die Fügeverbindungen mit Nieten aus 1.3815 keine Risse auf [124]. Ein typischer Fehler beim Fügen von hochfestem Stahl ist die übermäßige Stauchung des Nietschafts [13]. Bei den P-Nieten ist im Gegensatz zu den Nieten aus 1.3815 eine stärkere Stauchung erkennbar [124]. Durch die beim Einsatz von 1.3815 im Nietschaft erzielte hohe lokale Härte von mehr als 600 HV 0,02 wird die übermäßige Stauchung des Nietschafts verhindert. Dies wirkt auch dem Ausknicken des Nietschafts entgegen, welches in [67] beim Fügen von USI-BOR 1500 mit Nieten mit einer Härte von weniger als 550 HV ebenfalls als typischer Fehler beim Fügen von hochfestem Stahl identifiziert wird. Aus der Analyse von Stufensetzversuchen in [124] geht des Weiteren hervor, dass durch die Deformation des Niets während des Spreizvorgangs die

Härte hauptsächlich im äußeren Bereich des Nietfußes gesteigert wird. Die Kombination einer geringeren Härte im äußeren Nietfuß mit einer höheren Härte im inneren Nietfuß der Niete aus 1.3815 stellt einen günstigen Ausgangszustand dar, weil hierdurch Spielraum für die Verfestigung im Nietfuß beim Fügen gegeben ist und die mit dem Spreizen verbundene Deformation erleichtert wird. Die mechanischen Eigenschaften der neuartigen Niete aus 1.3815 werden somit als vorteilhaft für die Verbindungsbildung bewertet. Was die erreichte Nietgeometrie anbelangt, sind die im Vergleich zur Idealgeometrie erhöhte Kopfdicke und das damit verringerte Volumen für die Aufnahme des stempelseitigen Blechs unterhalb des Nietkopfes als unkritisch einzustufen, da kein Bruch des matrizenseitigen Fügepartners verursacht wird.

Dagegen kommt es beim Fügen von Materialkombination 1 mit Nieten aus 1.4541 zu einer übermäßigen Stauchung des Nietschafts, wodurch das Durchschneiden des stempelseitigen Blechs verhindert wird [124]. Bei Materialkombination 2 wird das obere Blech durch die Niete aus 1.4541 zwar durchtrennt, aber die Niete spreizen in der Folge nicht auf und werden stattdessen übermäßig gestaucht, was zu einer Reduzierung des für die Aufnahme des stempelseitigen Blechs verfügbaren Raums unterhalb des Nietkopfes und letztendlich zum Versagen des matrizenseitigen Blechs durch Bruch führt [124]. Folglich ist mit den Nieten aus 1.4541 die Herstellung einer defektfreien Fügeverbindung für keine der beiden untersuchten Materialkombinationen möglich. Dies bestätigt die bereits im Rahmen der Analyse der werkstoffseitigen Einflussgrößen getroffene Annahme, dass sich die Niete aus 1.4541 aufgrund der zu geringen Ausgangshärte und Kaltverfestigung des Edelstahl nicht für das Fügen von hochfestem Stahl eignen. Vom Einsatz von 1.4541 als Nietwerkstoff ist dementsprechend abzu sehen, wenn Lösungen für herausfordernde Fügeaufgaben wie das Fügen von hochfestem Stahl auf der Matrizenseite angestrebt werden. Dies unterstreicht erneut die Wichtigkeit der Wahl des Nietwerkstoffs und das besondere Potential hochstickstofflegierter Stähle wie 1.3815 für die Umformung von Verbindungselementen wie Halbhohlstanznieten, an welche bei derartigen Fügeaufgaben hohe Anforderungen in Bezug auf die Festigkeit gestellt werden.

Zur Evaluierung der erreichbaren Verbindungsfestigkeit von mittels der neuartigen Niete hergestellten Fügeverbindungen wurden am Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik quasistatische Kopfzug- und Scherzugversuche durchgeführt, deren Ergebnisse in [160] vorgestellt wurden. Der ermittelten Verbindungsfestigkeiten für die Verwendung konventioneller Niete und neuer Niete aus 1.3815 sind in Bild 64 gegenübergestellt.

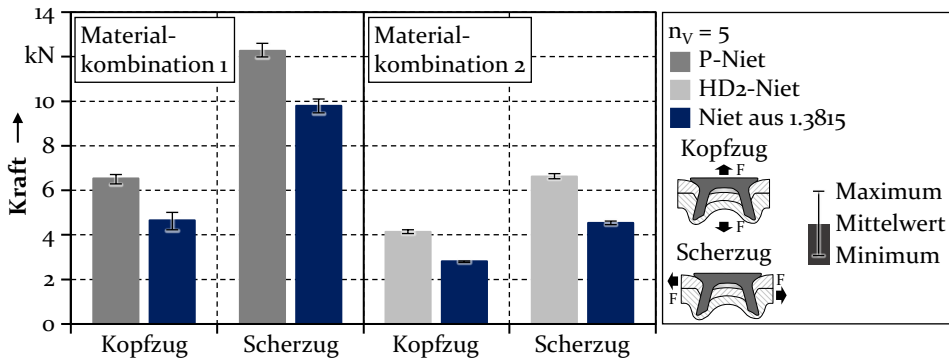


Bild 64: Verbindungsfestigkeit unter quasistatischer Kopfzug- und Scherzugbelastung nach [160]

Aus den Untersuchungen in [160] geht hervor, dass die mittels der neuen Niete aus 1.3815 hergestellten Fügeverbindungen im Vergleich zu den Verbindungen mit den konventionellen Nieten eine verringerte Verbindungsfestigkeit aufweisen, was hauptsächlich auf den geringeren Kopfdurchmesser der Niete aus 1.3815 zurückzuführen ist. Die beim Einsatz der Niete aus 1.3815 erreichten Verbindungsfestigkeiten werden in [160] zwar als prinzipiell ausreichend bewertet, müssen aber zukünftig gesteigert werden, um mit den Fügeverbindungen mit handelsüblichen Nieten vergleichbare Festigkeitswerte zu erzielen. Hierfür sind beispielsweise weiterführende Werkzeugkonzepte erforderlich, welche zu einer weiteren Reduzierung der hohen Beanspruchung der Umformwerkzeuge beitragen, um die Ausformung der Niete zu verbessern.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die neuen Niete aus 1.3815 für den Einsatz grundsätzlich qualifiziert sind. Der Nachweis der Eignung der neuartigen Niete für das Fügen unterschiedlicher Materialkombinationen mit dem hochfesten Stahl HCT780X auf der Matrizen Seite konnte anhand der in [124] vorgestellten Untersuchungen erbracht werden. Hierdurch wird das Potential der Herstellung von Nieten mit gradierten Eigenschaften und der Verkürzung der Prozesskette zur Nitherstellung durch die Auswahl eines geeigneten unkonventionellen Nietwerkstoffs aufgezeigt. Dies stellt die Basis für die Konzipierung maßgeschneiderter Nietverbindungen in der Zukunft durch die Anpassung der Nieteigenschaften in Abhängigkeit von den Anforderungen beim Fügen dar.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Der Mobilitätssektor befindet sich in einem zunehmenden Spannungsfeld zwischen der zwingenden Notwendigkeit von Umweltschutzmaßnahmen und den gleichzeitig steigenden Anforderungen an die Crashesicherheit von Fahrzeugen. Hieraus ergibt sich die Bedeutung von Leichtbaukonzepten und Mischbauweisen, für deren Realisierung mechanische Fügeverfahren wie das Halbhohlstanznieten unerlässlich sind. Die Verwendung von Werkstoffen mit immer höheren Festigkeiten stellt das Halbhohlstanznieten vor Herausforderungen, insbesondere wenn hochfeste Stahlwerkstoffe auf der Matrizen­seite gefügt werden soll. Zudem ist die Herstellung der Niete mit einem hohen Zeit-, Kosten- und Energieaufwand verbunden, da die Niete nach der Umformung sowohl vergütet als auch beschichtet werden müssen, um eine ausreichende Festigkeit, Duktilität und Korrosionsbeständigkeit sicherzustellen. Ein neuartiger Ansatz ist die Verwendung hochverfestigender, nichtrostender Werkstoffe wie beispielsweise hochstickstofflegierter Stähle als Nietwerkstoff, wodurch die Wärmebehandlung und die Beschichtung der Niete nicht mehr notwendig sind. Somit kann die Prozesskette der Nietherstellung verkürzt und in diesem Zusammenhang eine Reduzierung von Zeit, Kosten und Energie erzielt werden. Darüber hinaus verfügen die Niete in diesem Fall über gradierte mechanische Eigenschaften, welche nach der Umformung erhalten bleiben, während konventionelle Niete infolge der Wärmebehandlung homogene Eigenschaften aufweisen. Dies eröffnet das bislang noch nicht genutzte Potential, anforderungsgerechte Niete in Abhängigkeit von der Fügeaufgabe herzustellen. Allerdings ist die Umformung derartiger Werkstoffe aufgrund der hohen Kaltverfestigung mit großen Herausforderungen in Bezug auf die auftretende Werkzeugbeanspruchung verbunden, weshalb geeignete Werkzeugkonzepte und Umformstrategien erforderlich sind.

Daher war das Ziel dieser Arbeit, ein grundlegendes Prozessverständnis für die umformtechnische Herstellung von Halbhohlstanznieten aus hochverfestigenden Werkstoffen zu erarbeiten und anhand der Identifizierung von Möglichkeiten zur Beeinflussung der lokalen Nieteigenschaften eine Grundlage für die Herstellung von Nieten mit maßgeschneiderten Eigenschaften zu schaffen. Um dieses Ziel zu erreichen, wurde zunächst ein zweistufiger Nietherstellprozess im Labormaßstab, bestehend aus Napf-Rückwärts-Fließpressen mit nachfolgendem Stauchen des Nietkopfes einschließlich Kalibrierschritt, etabliert. Hierfür wurde ein Werkzeugkonzept erarbeitet, welches die Umformung von Nieten aus hochstickstofflegiertem

Stahl vor dem Hintergrund der hohen Werkzeugbeanspruchung ermöglicht. Die anhand dessen durchgeführten experimentellen Untersuchungen zur Nietherstellung unter Nutzung des hochstickstofflegierten Stahls 1.3815 als Nietwerkstoff wurden durch numerische Analysen erweitert, um ein tiefergehendes Prozessverständnis zu generieren. Auf dieser Basis erfolgte die Identifikation und Analyse prozessseitiger und werkstoffseitiger Einflussgrößen auf den Umformprozess und auf die erreichten geometrischen und mechanischen Bauteileigenschaften. Für das Erreichen eines ganzheitlichen Verständnisses wurden darüber hinaus Zusammenhänge zwischen den prozessseitigen und werkstoffseitigen Einflussgrößen aufgezeigt.

Aus der Analyse der prozessseitigen Einflussgrößen geht hervor, dass die Umformtemperatur den größten Einfluss sowohl auf den Umformprozess als auch auf die geometrischen und mechanischen Nieteigenschaften hat. Die Erhöhung der Prozesstemperatur führt zu einer Reduzierung der erforderlichen Umformkraft und der Werkzeugbeanspruchung, was maßgeblich aus der temperaturbedingt erleichterten Versetzungsbewegung und der unterschiedlichen Vorverfestigung der Näpfe resultiert. Bei erhöhter Temperatur wird zudem eine verbesserte Ausformung der Niete erreicht, wobei vor allem eine Vergrößerung des Kopfdurchmessers infolge des begünstigten radialen Stoffflusses im Kopfbereich erzielt wird, was als vorteilhaft im Hinblick auf die Verbindungsfestigkeit nach dem Fügen einzustufen ist. Darüber hinaus resultiert die Temperaturerhöhung in einer Veränderung der lokalen mechanischen Nieteigenschaften. Im Fall des Einsatzes von 1.3815 als Nietwerkstoff bedeutet dies eine Steigerung der Härte im Nietschaft und im Nietfuß, was für das Fügen von hochfestem Stahl als positiv erachtet wird. Anhand der Untersuchung unterschiedlicher Temperaturkombinationen zeigte sich, dass die Temperatur in der zweiten Umformstufe für das Auftreten der Temperatureffekte entscheidend ist. Dies kann für eine zielgerichtete Temperaturführung bei der Umformung der Niete genutzt werden, sodass die Energieeinsparung durch den Entfall der Wärmebehandlung und des Beschichtens insgesamt überwiegt. Im Gegensatz zur Umformtemperatur waren bei der Variation der Restbodendicke der für die Umformung in Stufe 2 eingesetzten Näpfe geringfügigere Einflüsse auf den Umformprozess und die untersuchten Bauteileigenschaften festzustellen. Mit abnehmender Restbodendicke ist tendenziell zwar eine Reduzierung der Prozesskräfte in Stufe 2 und eine Steigerung der Niethärte im Schaftbereich erkennbar, aber auch eine Verringerung des erreichten Kopfdurchmessers, was auf die unterschiedliche Vorverfestigung nach Stufe 1 und die Veränderung des Werkstoffflusses in Stufe 2 mit der Bildung lokaler Fließbehinderungen zurückzuführen ist und als nachteilig für die

resultierende Verbindungsfestigkeit nach dem Fügen bewertet wird. Des Weiteren ergab die Analyse des Einflusses von Schwankungen der Rohlingmaße, dass bei einer Zunahme des Rohlingvolumens mit einer Erhöhung der Prozesskräfte und der Werkzeugbeanspruchung in Stufe 2 zu rechnen ist. Die Veränderung des Durchmessers der eingesetzten Rohlinge hat einen größeren Einfluss als die Höhe, da dieser quadratisch in die Berechnung des Volumens eingeht. Beim Einsatz von Drahtwerkstoff bei der industriellen Nietherstellung ist daher sicherzustellen, dass im Speziellen für den oberen Toleranzbereich des Drahtdurchmessers die Werkzeugbeanspruchbarkeit nicht überschritten wird. In Bezug auf den Einfluss der Rohlingmaße auf die geometrischen Bauteileigenschaften steht der Vergrößerung des Kopfdurchmessers mit zunehmendem Rohlingvolumen das Erreichen einer größeren Kopfdicke bei unverändertem Stempelweg entgegen, was zu berücksichtigen ist, wenn beim Fügen ausreichend Raum unterhalb des Nietkopfes für die Aufnahme des stempelseitigen Blechs gewährleistet sein muss. Ein nennenswerter Einfluss der veränderten Rohlingmaße auf die mechanischen Nieteigenschaften war nicht zu verzeichnen.

Im Rahmen der Analyse der prozessseitigen Einflussgrößen wurden drei Prozessgrenzen in Verbindung mit der Umformtemperatur, der Restbodendicke der eingesetzten Näpfe und den Rohlingmaßen identifiziert. Erstens wurde bei der Umformung von Näpfen bei 300 °C im Gegensatz zur Umformung bei 200 °C eine Erhöhung der Rauheit der Aktivteile und dadurch bedingt eine starke Verringerung der Oberflächenqualität der Bauteile festgestellt. Zweitens traten bei der Verwendung von Näpfen mit einer Restbodendicke von 1,7 mm mit einem entsprechenden Verhältnis der Napfhöhe zur Restbodendicke von 3,5 aufgrund unterschiedlicher Stoffflussgeschwindigkeiten und lokaler Verfestigung im inneren Übergangsbereich vom Nietkopf zum Nietschaft Stoffflussfehler auf, durch welche die Gefahr der Rissbildung in diesem Bereich erhöht sein kann. Drittens wurde bei der Nutzung von Rohlingen mit verringertem Durchmesser und einem resultierenden Spiel von 0,2 mm in der Matrize eine mangelnde Konzentrizität der umgeformten Näpfe detektiert, deren Einsatz in Stufe 2 zum Werkzeugversagen durch eine ungleichmäßige Beanspruchung des Gegenstempels führen kann.

Zur Untersuchung der werkstoffseitigen Einflussgrößen wurde dem als Nietwerkstoff genutzten hochstickstofflegierten Stahl 1.3815 der Edelstahl 1.4541 gegenübergestellt. Hierbei auftretende Effekte und Unterschiede konnten maßgeblich auf die Fließgrenze, die Kaltverfestigung und die Ausgangshärte zurückgeführt werden. Aufbauend hierauf wurden verschie-

dene Einflussketten aufgestellt, welche das Zusammenspiel der Umformtemperatur und der werkstoffseitigen Einflussgrößen abbilden. Das Zusammenwirken der Prozesstemperatur und der temperaturabhängigen Werkstoffeigenschaften beeinflusst die erreichbaren mechanischen Nieteigenschaften in unterschiedlicher Weise. In Abhängigkeit davon, ob bei erhöhter Temperatur eine gesteigerte oder verringerte Kaltverfestigung vorliegt, wird die lokale Härte dementsprechend gesteigert oder verringert. Die Kenntnis dieser Zusammenhänge ist entscheidend, um die Nieteigenschaften durch die Wahl der Umformtemperatur und des Werkstoffs gezielt beeinflussen zu können.

Abschließend wurde die Eignung der im Rahmen dieser Arbeit hergestellten Niete anhand der Untersuchung des Einsatzverhaltens beim Fügen überprüft. Im Fokus standen zwei verschiedene zu fügende Materialkombinationen, bestehend aus der Aluminiumlegierung EN AW-5083 und dem insbesondere matrizenseitig eingesetzten hochfesten Stahl HCT780X. Die Niete aus 1.3815 konnten im Gegensatz zu den Nieten aus 1.4541 erfolgreich für die Herstellung der unterschiedlichen Fügeverbindungen eingesetzt werden, wodurch das große Potential derartig hochverfestigender Werkstoffe für den Einsatz als Nietwerkstoff bestätigt wird.

Zusammenfassend wurde im Rahmen der Arbeit ein umfassendes Prozessverständnis für die Herstellung von Nieten aus hochverfestigenden Werkstoffen erarbeitet. Der Nachweis der Herstellbarkeit von Nieten aus hochstickstofflegiertem Stahl mit gradierten mechanischen Eigenschaften sowie der Eignung der Niete für das Fügen von hochfestem Stahl konnte erbracht werden. Da die üblicherweise notwendige Nachbehandlung der Niete mittels Wärmebehandlung und Beschichten entfällt, wird durch den neuartigen Ansatz die Prozesskette verkürzt. Dadurch wird ein Beitrag auf dem Weg hin zu hocheffizienten und nachhaltigen Produktionsprozessen geleistet. Im Rahmen zukünftiger Arbeiten werden Ansätze für die gesamte Prozesskette von der Werkstoffentwicklung und -herstellung bis zum Ende des Produktlebenszyklus benötigt. Die dargelegten Erkenntnisse bilden darüber hinaus eine Grundlage für die gezielte Beeinflussung der lokalen Nieteigenschaften und eröffnen somit die Möglichkeit, maßgeschneiderte Niete mit gradierten Eigenschaften entsprechend den Anforderungen beim Fügen herzustellen. Hierfür ist der Rückfluss von Erkenntnissen zum Einfluss der Umformparameter auf den Fügeprozess unabdingbar und sollte daher Gegenstand zukünftiger Forschungsaktivitäten sein. Ein weiterer Fokus sollte auf der Erarbeitung weiterführender Werkzeugkonzepte und Umformstrategien liegen, um eine weitere Reduzierung der Werkzeugbeanspruchung und Verbesserung der Ausformung der Niete zu erzielen.

9 Summary and outlook

The mobility sector is caught between the urgent need for environmental protection measures and the simultaneously increasing demands on vehicle crash safety. This results in the relevance of lightweight and multi material design, for the realisation of which mechanical joining processes such as semi-tubular self-piercing riveting are indispensable. However, the use of materials with increasing strength also poses challenges for semi-tubular self-piercing riveting, especially when high-strength steel is to be joined on the die side. In addition, the manufacture of rivets is time-consuming, costly and energy-intensive, since the rivets have to be hardened and tempered as well as coated after forming to ensure a sufficient strength, ductility and corrosion resistance. A novel approach is the use of high strain hardening stainless materials such as high nitrogen steels as rivet materials, which makes the heat treatment and the coating of the rivets obsolete. This makes it possible to shorten the rivet manufacturing process chain and thus reduce time, costs and energy consumption. In addition, the rivets in this case exhibit graded mechanical properties, which are retained after forming, while conventional rivets have homogeneous properties as a result of heat treatment. This opens up the potential, which has not yet been exploited, of producing rivets that meet requirements depending on the joining task. However, due to the high strain hardening, the forming of such materials is associated with major challenges with regard to the tool stresses occurring during forming, which is why suitable tool concepts and forming strategies are required.

Therefore, the aim of this work was to work out a fundamental process understanding for the forming of rivets using high strain hardening materials and to create a basis for the manufacture of rivets with tailored properties by identifying possibilities for influencing the local rivet properties. To achieve this goal, a two-stage rivet forming process was first established on a laboratory scale, consisting of cup-backward extrusion followed by the upsetting of the rivet head including a calibration step. For this purpose, a tool concept was designed, which enables the forming of rivets made of high nitrogen steel against the background of the high tool stresses. The experimental investigations using the high nitrogen steel 1.3815 as rivet material were extended by numerical analyses in order to generate a deeper understanding of the process. On this basis, process-related and material-related influencing factors on the forming process and on the geometric and mechanical rivet properties were identified and analysed. In order to

achieve a holistic understanding, correlations between the process-related and material-related influencing factors were also pointed out.

The analysis of the process-related influencing variables reveals that the forming temperature has the greatest influence both on the forming process and on the geometric and mechanical rivet properties. Increasing the process temperature leads to a reduction of the required forming force and tool stresses, which is mainly due to the temperature-induced facilitated dislocation movement and the different pre-strengthening of the cups. At higher temperatures, the geometrical quality of the rivets is also improved. As a result of the enhanced radial material flow in the area of the rivet head at elevated temperature, the head diameter is increased in particular, which is advantageous with regard to the joint strength after joining. Additionally, the temperature increase results in a change of the local mechanical rivet properties. In the case of 1.3815, this means an increase in hardness in the rivet shank and foot, which is considered positive for joining high-strength steel. The investigation of different temperature combinations showed that the temperature in the second forming stage is decisive for the occurrence of the temperature effects. This can be used for targeted temperature control during the forming of the rivets, so that the overall energy saving due to the elimination of heat treatment and coating predominates. In contrast to the forming temperature, the variation of the residual base thickness of the cups used for the second forming stage had a minor influence on the forming process and the investigated part properties. With decreasing residual base thickness, there is the tendency of a reduction of the process forces in stage 2 and an increase of the hardness in the area of the rivet shank, but also a reduction of the achieved head diameter, which can be attributed to the different pre-strengthening of parts after stage 1 and a change of the material flow in stage 2 including the formation of local flow obstructions and which is assessed as disadvantageous for the resulting joint strength after joining. Furthermore, the analysis of the influence of variations in the billet dimensions showed that an increase of the billet volume leads to an increase of the process forces and the tool stress in stage 2. The change of the diameter of the billets used has a greater influence than the height, since this is taken into account quadratically in the calculation of the volume. When using wire material in industrial rivet production, it must therefore be ensured that the tool load capacity is not exceeded, especially for the upper tolerance range of the wire diameter. With regard to the influence of the billet dimensions on the geometric properties, the increase of the head diameter with increasing billet volume is countered by a greater head thickness for the same punch displacement, which must be

taken into account if sufficient space below the rivet head must be ensured for the punch-sided sheet during joining. No significant influence of the changed billet dimensions on the mechanical properties of the rivets was observed.

In the context of the analysis of the process-side influencing factors, three process limits were identified for the forming temperature, the residual base thickness of the cups and the billet dimensions respectively. Firstly, when forming cups at 300 °C in contrast to 200 °C, an increase of the roughness of the active parts and, as a result, a strong reduction of the surface quality of the parts was observed. Secondly, when using cups with a residual bottom thickness of 1.7 mm with a corresponding ratio of cup height to residual base thickness of 3.5, due to different flow velocities and local strengthening in the inner transition area from the rivet head to the rivet shank, material flow defects occurred, which can increase the risk of crack formation in this area. Thirdly, when using billets with reduced diameter and a resulting die clearance of 0.2 mm, a lack of concentricity of the formed cups was found, the use of which in stage 2 can lead to tool failure due to uneven loading of the counter punch.

To investigate the material-related influencing factors, the high nitrogen steel 1.3815 used as rivet material was compared to the stainless steel 1.4541. The effects and differences that occurred could be attributed mainly to the yield strength, the strain hardening and the initial hardness. Based on this, various chains of influences were formulated, which depict the interaction of the forming temperature and the material-side influencing factors. The interaction of the process temperature and the temperature-dependent material properties influences in particular the achievable mechanical rivet properties in different ways. Depending on whether strain hardening is increased or reduced at elevated temperature, the local hardness is increased or reduced accordingly. The knowledge of these correlations is essential in order to be able to specifically modify the rivet properties by selecting the forming temperature and the rivet material.

Finally, the suitability of the rivets manufactured in the scope of this work was verified by investigating their application behaviour during joining. The focus was on two different material combinations to be joined, consisting of the aluminum alloy EN AW-5083 and the high-strength steel HCT780X, which was used in particular on the die side. In contrast to the rivets made of 1.4541, the rivets made of 1.3815 could be successfully used for the creation of the various joints, which confirms the enormous potential of such high strain hardening materials as rivet materials.

In summary, a comprehensive process understanding for the manufacture of rivets from high strain hardening, stainless materials was obtained in the course of the work. It was possible to demonstrate the feasibility of manufacturing rivets from high nitrogen steel with graded mechanical properties and the suitability of the rivets for joining high-strength steel. Since the heat treatment and the coating of the rivets, which is usually necessary, is no longer required, the process chain is shortened by the novel approach. This contributes to the progress towards highly efficient and sustainable production processes. In the future, approaches for the entire process chain from material development and production to the end of the product life cycle will be needed. Moreover, the findings presented provide a basis for the targeted modification of local rivet properties and thus open up the possibility of producing tailored rivets with graded properties in accordance with the requirements of the joining process. For this purpose, the transfer of knowledge about the influence of the forming parameters on the joining process is indispensable and should therefore be subject of future research activities. A further focus should be on the development of advanced tool concepts and forming strategies in order to achieve a reduction of tool stresses and a further improved geometric quality of the rivets.

Literaturverzeichnis

- [1] Verordnung (EU) 2021/1119 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Juni 2021 zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 („Europäisches Klimagesetz“). Rat der Europäischen Union und Europäisches Parlament, 2021
- [2] https://ec.europa.eu/clima/eu-action/transport-emissions_de (aufgerufen am 08.12.2023)
- [3] Verordnung (EU) 2019/631 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. April 2019 zur Festlegung von CO₂-Emissionsnormen für neue Personenkraftwagen und für neue leichte Nutzfahrzeuge und zur Aufhebung der Verordnungen (EG) Nr. 443/2009 und (EU) Nr. 510/2011. Rat der Europäischen Union und Europäisches Parlament, 2019
- [4] Verordnung (EU) 2019/1242 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019 zur Festlegung von CO₂-Emissionsnormen für neue schwere Nutzfahrzeuge und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 595/2009 und (EU) 2018/956 des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Richtlinie 96/53/EG des Rates. Rat der Europäischen Union und Europäisches Parlament, 2019
- [5] 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.; Simufact Engineering GmbH (Hrsg.): 13. RoundTable – Simulation in der Umformtechnik Meisenbach, 2012, S. 291–302
- [6] Furrer, P.; Müller, A.; Reier, T.; Mütze, S.; Eggers, U.; Geffert, A.; Kopp, G.; Schöneburg, R.; Scherzer, D.; Hahn, O.; Janzen, V.; Meschut, G.; Olfermann, T.; Süllentrop, S.; Gadow, R.; Gaul, L.; Kröff, A.; Decking, K.; Eichenseer, T.; Widegger, G.: Werkstoff- und Halbzeugtechnologien für Leichtbau-Anwendungen. In: Friedrich, H. E. (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017, S. 451–732
- [7] Ellenrieder, G.; Friedrich, H. E.; Kienzle, S.: Leichtbaukonzepte für heute und morgen. In: Friedrich, H. E. (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017, S. 773–826

- [8] Wang, J.; Li, Y.; Hu, G.; Yang, M.: Lightweight Research in Engineering: A Review. *Applied Sciences* 9(2019)24, S. 5322
- [9] Friedrich, H. E.; Krishnamoorthy, S. K.: Leichtbau als Treiber von Innovationen. In: Friedrich, H. E. (Hrsg.): *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017, S. 1–31
- [10] Sarpe, M.; Treutler, K.; Wesling, V.; Dewald, P.; Schmale, H. C.: Influence of classified pore contents on the quasi-static and cyclic strength properties of the welded joint in gas-shielded metal arc welding of galvanized, high-strength steels. *Journal of Advanced Joining Processes* 5(2022)3, S. 100094
- [11] Meschut, G.; Hahn, O.; Janzen, V.; Olfermann, T.: Innovative joining technologies for multi-material structures. *Welding in the World* 58(2014)1, S. 65–75
- [12] Groche, P.; Wohletz, S.; Brenneis, M.; Pabst, C.; Resch, F.: Joining by forming – A review on joint mechanisms, applications and future trends. *Journal of Materials Processing Technology* 214(2014)10, S. 1972–1994
- [13] Li, D.; Chrysanthou, A.; Patel, I.; Williams, G.: Self-piercing riveting – a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 92(2017)5-8, S. 1777–1824
- [14] DIN8593-5:2003-09: *Fertigungsverfahren Fügen – Teil 5: Fügen durch Umformen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*
- [15] DIN8580:2003-09: *Fertigungsverfahren – Begriffe, Einteilung*
- [16] DVS/EFB-Merkblatt 3410: *Stanznieten – Überblick*. DVS/EFB, 2005
- [17] Mori, K.-i.; Bay, N.; Fratini, L.; Micari, F.; Tekkaya, A. E.: Joining by plastic deformation. *CIRP Annals* 62(2013)2, S. 673–694
- [18] Eichlseder, W.; Schöneburg, R.: Anforderungen an den Leichtbau im Fahrzeug. In: Friedrich, H. E. (Hrsg.): *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2017, S. 125–182
- [19] Salamati, M.; Soltanpour, M.; Fazli, A.; Zajkani, A.: Processing and tooling considerations in joining by forming technologies; part A – mechanical joining. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 101(2019)1-4, S. 261–315
- [20] He, X.; Pearson, I.; Young, K.: Self-pierce riveting for sheet materials. *Journal of Materials Processing Technology* 199(2008)1-3, S. 27–36

- [21] Atzeni, E.; Ippolito, R.; Settineri, L.: Experimental and numerical appraisal of self-piercing riveting. *CIRP Annals* 58(2009)1, S. 17–20
- [22] <https://www.ema-indutec.com/service/dienstleistungen/umweltschutz/umweltschutz> (aufgerufen am 19.12.2023)
- [23] Mendikoa, I.; Sorli, M.; Armijo, A.; García, L.; Erausquin, L.; Insunza, M.; Bilbao, J.; Friden, H.; Björk, A.; Bergfors, L.; Skema, R.; Alzbutas, R.; Iesmantas, T.: Heat Treatment Process Energy Efficient Design and Optimisation. *Procedia Engineering* 63(2013)1-3, S. 303–309
- [24] Mori, K.-i.; Abe, Y.: A review on mechanical joining of aluminium and high strength steel sheets by plastic deformation. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture* 1(2018)1, S. 1–11
- [25] Uhe, B.; Kuball, C.-M.; Merklein, M.; Meschut, G.: Improvement of a rivet geometry for the self-piercing riveting of high-strength steel and multi-material joints. *Production Engineering* 14(2020)4, S. 417–423
- [26] Meschut, G.; Janzen, V.; Olfermann, T.: Innovative and Highly Productive Joining Technologies for Multi-Material Lightweight Car Body Structures. *Journal of Materials Engineering and Performance* 23(2014)5, S. 1515–1523
- [27] Abe, Y.; Kato, T.; Mori, K.: Aluminium Alloy Self-Pierce Riveting for Joining of Aluminium Alloy Sheets. *Key Engineering Materials* 410-411(2009), S. 79–86
- [28] Schulz-Beenken, A.; Budde, L.: DE 44 31 769 C2 – Stanzniet aus rostfreiem Stahl. Patentschrift, Böllhoff GmbH, Aktenzeichen P 44 31 769.7-24, Anmeldung 1994, Offenlegung 1996, Veröffentlichung 2002
- [29] Hahn, O.; Flügge, W.; Schulz-Beenken, A.; Schulte, J.; Schuberth, S.; Heise, F.-J.: Entwicklung von Verfahren zum Stanznieten nichtrostender hochlegierter Stähle mit nichtrostenden Nieten. Abschlussbericht FOSTA-Projekt P401. Universität Paderborn: Forschung für die Praxis P, Bd. 401, Düsseldorf: Verl. u. Vertriebsges. mbH, 2009
- [30] Abe, Y.; Kato, T.; Mori, K.: Joinability of aluminium alloy and mild steel sheets by self piercing rivet. *Journal of Materials Processing Technology* 177(2006)1-3, S. 417–421
- [31] Mori, K.; Kato, T.; Abe, Y.; Ravshanbek, Y.: Plastic Joining of Ultra High Strength Steel and Aluminium Alloy Sheets by Self Piercing Rivet. *CIRP Annals* 55(2006)1, S. 283–286

- [32] He, X.; Zhao, L.; Deng, C.; Xing, B.; Gu, F.; Ball, A.: Self-piercing riveting of similar and dissimilar metal sheets of aluminum alloy and copper alloy. *Materials & Design* 65(2015)10, S. 923–933
- [33] Luo, A.; Lee, T.; Carter, J.: Self-Pierce Riveting of Magnesium to Aluminum Alloys. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing* 4(2011)1, S. 158–165
- [34] He, X.; Wang, Y.; Lu, Y.; Zeng, K.; Gu, F.; Ball, A.: Self-piercing riveting of similar and dissimilar titanium sheet materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 80(2015)9–12, S. 2105–2115
- [35] Jäckel, M.; Grimm, T.; Niegsch, R.; Drossel, W.-G.: Overview of Current Challenges in Self-Pierce Riveting of Lightweight Materials. 18th International Conference on Experimental Mechanics, Brüssel, Belgien, 1.-5. Juli 2018. *Proceedings* 2(2018)8, S. 384
- [36] Settineri, L.; Atzeni, E.; Ippolito, R.: Self piercing riveting for metal-polymer joints. *International Journal of Material Forming* 3(2010)S1, S. 995–998
- [37] Fratini, L.; Ruisi, V. F.: Self-piercing riveting for aluminium alloys-composites hybrid joints. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 43(2009)1–2, S. 61–66
- [38] Meschut, G.; Gude, M.; Augenthaler, F.; Geske, V.: Evaluation of Damage to Carbon-fibre Composites Induced by Self-pierce Riveting. *Procedia CIRP* 18(2014), S. 186–191
- [39] Meschut, G.; Augenthaler, F.: Abschlussbericht – Hybridfügen von Mischbaustrukturen aus faserverstärkten Kunststoffen mit metallischen Halbzeugen. DVS Forschungsvereinigung Bd. 289, 2015
- [40] Mori, K.: Assessing the suitability of materials for self-piercing riveting (SPR). In: Chrysanthou, A.; Sun, X. (Hrsg.): *Self-piercing riveting – Properties, processing and applications*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 2014, S. 111–123
- [41] Martinsen, K.; Hu, S. J.; Carlson, B. E.: Joining of dissimilar materials. *CIRP Annals* 64(2015)2, S. 679–699
- [42] Cacko, R.; Czyzewski, P.; Kocanda, A.: Initial optimization of self-piercing riveting process by means of FEM. *Steel-Grips* 2(2004) Suppl. *Metal Forming* 2004, S. 307–310

- [43] Abe, Y.; Kato, T.; Mori, K.: Self-piercing riveting of high tensile strength steel and aluminium alloy sheets using conventional rivet and die. *Journal of Materials Processing Technology* 209(2009)8, S. 3914–3922
- [44] Lou, M.; Li, Y.; Li, Y.; Chen, G.: Behavior and Quality Evaluation of Electroplastic Self-Piercing Riveting of Aluminum Alloy and Advanced High Strength Steel. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 135(2013)1, S. 011005:1–9
- [45] Lou, M.; Li, Y.; Wang, Y.; Wang, B.; Lai, X.: Influence of resistance heating on self-piercing riveted dissimilar joints of AA6061-T6 and galvanized DP590. *Journal of Materials Processing Technology* 214(2014)10, S. 2119–2126
- [46] Jiang, H.; Gao, S.; Li, G.; Cui, J.: Structural design of half hollow rivet for electromagnetic self-piercing riveting process of dissimilar materials. *Materials & Design* 183(2019), S. 108141:1–10
- [47] Liang, J.; Jiang, H.; Zhang, J.; Wu, X.; Zhang, X.; Li, G.; Cui, J.: Investigations on mechanical properties and microtopography of electromagnetic self-piercing riveted joints with carbon fiber reinforced plastics/aluminum alloy 5052. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 19(2019)1, S. 240–250
- [48] Meschut, G.; Matzke, M.; Hoerhold, R.; Olfermann, T.: Hybrid Technologies for Joining Ultra-high-strength Boron Steels with Aluminum Alloys for Lightweight Car Body Structures. *Procedia CIRP* 23(2014)5, S. 19–23
- [49] Li, D. Z.; Han, L.; Lu, Z. J.; Thornton, M.; Shergold, M.: Influence of Die Profiles and Cracks on Joint Buttons on the Joint Quality and Mechanical Strengths of High Strength Aluminium Alloy Joint. *Advanced Materials Research* 548(2012), S. 398–405
- [50] Falk, T.; Jäckel, M.: Increasing flexibility of self-pierce riveting using numerical and statistical methods. *Procedia Manufacturing* 29(2019)4, S. 264–270
- [51] Drossel, W. G.; Jäckel, M.: New Die Concept for Self-Pierce Riveting Materials with Limited Ductility. *Key Engineering Materials* 611-612(2014), S. 1452–1459
- [52] Abe, Y.; Kato, T.; Mori, K.: Self-pierce riveting of three high strength steel and aluminium alloy sheets. *International Journal of Material Forming* 1(2008)S1, S. 1271–1274

- [53] Mori, K.; Abe, Y.; Kato, T.: Self-pierce riveting of multiple steel and aluminium alloy sheets. *Journal of Materials Processing Technology* 214(2014)10, S. 2002–2008
- [54] Li, D.; Han, L.; Chrysanthou, A.; Shergold, M.; Williams, G.: The Effect of Setting Velocity on the Static and Fatigue Strengths of Self-Piercing Riveted Joints for Automotive Applications. In: TMS (Hrsg.): TMS 2014 143rd Annual Meeting & Exhibition, San Diego, CA, USA. Supplemental Proceedings. John Wiley & Sons, Inc., 2014, S. 557–564
- [55] Li, D.; Han, L.; Thornton, M.; Shergold, M.: Influence of edge distance on quality and static behaviour of self-piercing riveted aluminium joints. *Materials & Design* 34(2012)8, S. 22–31
- [56] Han, L.; Young, K. W.; Hewitt, R.; Alkahari, M. R.; Chrysanthou, A.: Effect of Sheet Material Coatings on Quality and Strength of Self-Piercing Riveted Joints. SAE 2006 World Congress & Exhibition, SAE Technical Paper 2006-01-0775, 2006
- [57] Karim, M. A.; Jeong, T.-E.; Noh, W.; Park, K.-Y.; Kam, D.-H.; Kim, C.; Nam, D.-G.; Jung, H.; Park, Y.-D.: Joint quality of self-piercing riveting (SPR) and mechanical behavior under the frictional effect of various rivet coatings. *Journal of Manufacturing Processes* 58(2020), S. 466–477
- [58] Sun, X.: Optimization of the strength of self-piercing rivets (SPRs): Self-Piercing Riveting. In: Chrysanthou, A.; Sun, X. (Hrsg.): Self-piercing riveting – Properties, processing and applications. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK, 2014, S. 149–170
- [59] Kappe, F.; Bielak, C. R.; Sartisson, V.; Bobbert, M.; Meschut, G.: Influence of rivet length on joint formation on self-piercing riveting process considering further process parameters. 24th International ESAFORM Conference on Material Forming (ESAFORM 2021), 14.-16. April 2021, Liège, Belgien, 4277:1–13
- [60] Ang, H. Q.: An Overview of Self-piercing Riveting Process with Focus on Joint Failures, Corrosion Issues and Optimisation Techniques. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 34(2021)2, S. 1–25
- [61] Li, D. Z.; Han, L.; Shergold, M.; Thornton, M.; Williams, G.: Influence of Rivet Tip Geometry on the Joint Quality and Mechanical Strengths of Self-Piercing Riveted Aluminium Joints. *Materials Science Forum* 765(2013), S. 746–750

- [62] Philipskötter, A.; Eckstein, J.; Ruther, M.; Wältz, H.; Porepp, R.: DE 10 2005 052 360 A1 – Stanzniet. Offenlegungsschrift. DaimlerChrysler AG, Böllhoff Verbindungstechnik GmbH, Aktenzeichen 10 2005 052 360.9, Anmeldung 2005, Offenlegung 2007
- [63] Kraus, C.; Falk, T.; Mauermann, R.; Drossel, W.-G.: Development of a New Self-flaring Rivet Geometry Using Finite Element Method and Design of Experiments. *Procedia Manufacturing* 47(2020)10, S. 383–388
- [64] <https://media.boellhoff.com/files/pdf/rivset-hdx-de-6747.pdf> (aufgerufen am 21.12.2022)
- [65] Philipskötter, A.: Entwicklung eines Halbhohlstanznietes für das Fügen von Mischbauweisen aus Aluminium und höherfesten Stählen – Dissertation. Universität Paderborn, 2006. In: Hahn, O.; Meschut, G. (Hrsg.): *Berichte aus dem Laboratorium für Werkstoff- und Füge-technik*, Bd. 72, Shaker Verlag, Aachen, 2006
- [66] Mucha, J.: A Study of Quality Parameters and Behaviour of Self-Piercing Riveted Aluminium Sheets with Different Joining Conditions. *Strojniški vestnik – Journal of Mechanical Engineering* 57(2011)4, S. 323–333
- [67] van Hall, S. N.; Findley, K. O.; Campbell, A. M.: Evaluating the Performance of Current Self-Pierce Rivet Technology for the Joining of High Strength Steel and Aluminum Alloys. ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the JSME 2014 International Conference on Materials and Processing and the 42nd North American Manufacturing Research Conference, 9.-13. Juni 2014, Detroit, MI, USA. *Proceedings, Volume 2: Processing*, ASME, The American Society of Mechanical Engineers, 2014
- [68] DIN8582:2003-09: *Fertigungsverfahren Umformen – Einordnung; Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht*
- [69] Lange, K.: *Umformtechnik – Handbuch für Industrie und Wissenschaft – Band 1: Grundlagen*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1984, 2., völlig Neubearb. Aufl.
- [70] Doege, E.; Behrens, B.-A.: *Handbuch Umformtechnik – Grundlagen, Technologien, Maschinen*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010, 2., bearbeitete Aufl.

- [71] Dietrich, J.: Praxis der Umformtechnik – Umform- und Zerteilverfahren, Werkzeuge, Maschinen. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2018, 12., überarbeitete und erweiterte Aufl.
- [72] Tekkaya, A. E.; Allwood, J. M.; Bariani, P. F.; Bruschi, S.; Cao, J.; Gramlich, S.; Groche, P.; Hirt, G.; Ishikawa, T.; Löbke, C.; Lueg-Althoff, J.; Merklein, M.; Misiolek, W. Z.; Pietrzyk, M.; Shivpuri, R.; Yanagimoto, J.: Metal forming beyond shaping: Predicting and setting product properties. CIRP Annals 64(2015)2, S. 629–653
- [73] Merklein, M.; Ndzomssi, F.; Engel, U.: Investigation of the influence of tool geometry on effective strain distribution in full forward extrusion. 14th International ESAFORM Conference on Material Forming (ESAFORM 2011), 27.-29. April 2011, Belfast, UK. AIP Conference Proceedings 1353(2011)1, S. 419–424
- [74] Tumer, H.; Sonmez, F. O.: Optimum shape design of die and preform for improved hardness distribution in cold forged parts. Journal of Materials Processing Technology 209(2009)3, S. 1538–1549
- [75] Gavriljuk, V. G.: Nitrogen in Iron and Steel. ISIJ International 36(1996)7, S. 738–745
- [76] Weißbach, W.; Dahms, M.; Jaroschek, C.: Werkstoffkunde – Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2015, 19., vollständig überarbeitete und erweiterte Aufl.
- [77] Klocke, F.: Fertigungsverfahren 4 – Umformen. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2017, 6. Aufl.
- [78] Stein, G.; Hucklenbroich, I.; Feichtinger, H.: Current and Future Applications of High Nitrogen Steels. Materials Science Forum 318–320(1999), S. 151–160
- [79] Uggowitzer, P. J.; Magdowski, R.; Speidel, M. O.: High Nitrogen Steels. Nickel Free High Nitrogen Austenitic Steels. ISIJ International 36(1996)7, S. 901–908
- [80] Speidel, M. O.: Nitrogen Containing Austenitic Stainless Steels. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 37(2006)10, S. 875–880
- [81] Rashev, T. V.; Eliseev, A. V.; Zhekova, L. T.; Borgev, P. V.: High-Nitrogen Steel. Steel in Translation 49(2019)7, S. 433–439
- [82] Zitter, H.; Habel, L.: Zur Löslichkeit des Stickstoffs in Reineisen und austenitischen Chrom-Nickel-Stählen. Archiv für das Eisenhüttenwesen 44(1973)3, S. 181–188

- [83] Rapatz, F.: Verwendungsmöglichkeiten von nichtrostenden und hitzebeständigen Stählen mit Stickstoffzusatz. *Stahl und Eisen – Zeitschrift für das deutsche Eisenhüttenwesen* 61(1941)48, S. 1073–1078
- [84] Satir-Kolorz, A.; Feichtinger, H. K.; Speidel, M. O.: Literaturstudie und theoretische Betrachtungen zum Lösungsverhalten von Stickstoff in Eisen-, Stahl- und Stahlgußschmelzen. Sonderdruck aus *Gießereiforschung* 42(1990)1, Giesserei-Verlag GmbH, Düsseldorf, S. 36–49
- [85] Berns, H.: Manufacture and Application of High Nitrogen Steels. *ISIJ International* 36(1996)7, S. 909–914
- [86] Stein, G.; Menzel, J.; Choudhury, A.: Industrial manufacture of massively nitrogen-alloyed steels in a pressure ESR furnace. *Steel Times*, London 217(1989)3, S. 146–150
- [87] Gavriljuk, V. G.; Berns, H.: High Nitrogen Steels – Structure, Properties, Manufacture, Applications. *Engineering Materials*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1999
- [88] Gottstein, G.: *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik – Physikalische Grundlagen*. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, 2014, 4., neu bearbeitete Aufl.
- [89] Müllner, P.; Solenthaler, C.; Uggowitzer, P.; Speidel, M. O.: On the effect of nitrogen on the dislocation structure of austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A* 164(1993)1–2, S. 164–169
- [90] Peng, M.; Shi, J.; Cui, B.; Sun, T.; Li, X.; Wang, M.: Effect of Cold Deformation on Microstructure and Mechanical Properties of a Fe-20Mn-19Cr-0.5C-0.6N High Nitrogen Austenitic Steel. *Steel Research International* 88(2017)11, S. 1700069:1–8
- [91] Kubota, S.; Xia, Y.; Tomota, Y.: Work-hardening Behavior and Evolution of Dislocation-microstructures in High-nitrogen Bearing Austenitic Steels. *ISIJ International* 38(1998)5, S. 474–481
- [92] Simmons, J. W.: Overview: high-nitrogen alloying of stainless steels. *Materials Science and Engineering: A* 207(1996)2, S. 159–169
- [93] Ritzenhoff, R.; Hahn, A.: Corrosion Resistance of High Nitrogen Steels. In: Shih, H. (Hrsg.): *Corrosion Resistance*. IntechOpen, London, UK 2012, S. 55–80
- [94] Sun, G.; Zhang, Y.; Sun, S.; Hu, J.; Jiang, Z.; Ji, C.; Lian, J.: Plastic flow behavior and its relationship to tensile mechanical properties of high

- nitrogen nickel-free austenitic stainless steel. *Materials Science and Engineering: A* 662(2016), S. 432–442
- [95] Takahashi, F.; Momoi, Y.; Kajikawa, K.; Yamada, H.: Effect of Nitrogen Content on Cold Working Properties of High-strength Mn-Cr-N Steels Made Using Pressurized ESR. *ISIJ International* 55(2015)3, S. 578–585
 - [96] Rawers, J.; Grujicic, M.: Effects of metal composition and temperature on the yield strength of nitrogen strengthened stainless steels. *Materials Science and Engineering: A* 207(1996)2, S. 188–194
 - [97] Norström, L.-Å.: The influence of nitrogen and grain size on yield strength in Type AISI 316L austenitic stainless steel. *Metal Science* 11(1977)6, S. 208–212
 - [98] Li, H.-b.; Jiang, Z.-h.; Zhang, Z.-r.; Yang, Y.: Effect of Grain Size on Mechanical Properties of Nickel-Free High Nitrogen Austenitic Stainless Steel. *Journal of Iron and Steel Research International* 16(2009)1, S. 58–61
 - [99] Reed, R. P.: Nitrogen in austenitic stainless steels. *JOM – The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society (TMS)* 41(1989)3, S. 16–21
 - [100] Harzenmoser, M. A. E.: Massiv aufgestickte austenitisch-rostfreie Stähle und Duplexstähle – Dissertation. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1990
 - [101] Riedner, S.: Höchstfeste nichtrostende austenitische CrMn-Stähle mit (C+N) – Dissertation. Ruhr-Universität Bochum, 2010
 - [102] Di Schino, A.; Kenny, J. M.; Barteri, M.: High temperature resistance of a high nitrogen and low nickel austenitic stainless steel. *Journal of Materials Science Letters* 22(2003)9, S. 691–693
 - [103] Samantaray, D.; Mandal, S.; Albert, S. K.; Bhaduri, A. K.; Jayakumar, T.: Thermally Activated Deformation of a High-Nitrogen Grade 316LN Stainless Steel under Compressive Loading. *Materials Science Forum* 710(2012), S. 477–482
 - [104] Ritzenhoff, R.; Diehl, V.; Hahn, A.; Gharbi, M. M.: Kaltwalzen von HNS-Legierungen. *UTF-Science IV*(2013), S. 1–10
 - [105] Simmons, J. W.; Covino, J. B. S.; Hawk, J. A.; Dunning, J. S.: Effect of Nitride (Cr₂N) Precipitation on the Mechanical, Corrosion, and Wear Properties of Austenitic Stainless Steel. *ISIJ International* 36(1996)7, S. 846–854

- [106] Vanderschaeve, F.; Taillard, R.; Foct, J.: Discontinuous precipitation of Cr_2N in a high nitrogen, chromium-manganese austenitic stainless steel. *Journal of Materials Science* 30(1995)23, S. 6035–6046
- [107] Rawers, J. C.; Dunning, J. S.; Asai, G.; Reed, R. P.: Characterization of stainless steels melted under high nitrogen pressure. *Metallurgical Transactions A* 23(1992)7, S. 2061–2068
- [108] Shao, C.-W.; Shi, F.; Guo, W.-W.; Li, X.-W.: Plastic Deformation and Damage Behaviors of Fe-18Cr-18Mn-0.63N High-Nitrogen Austenitic Stainless Steel under Uniaxial Tension and Compression. *Materials Transactions* 56(2015)1, S. 46–53
- [109] Kim, Y.-S.; Nam, S. M.; Kim, S.-J.: Strain rate dependence of deformation behavior of high-nitrogen austenitic steels. *Journal of Materials Processing Technology* 187-188(2007), S. 575–577
- [110] Stein, G.; Hucklenbroich, I.; Wagner, M.: P 2000 - a New Austenitic High Nitrogen Steel for Power Generating Equipment. *Materials Science Forum* 318-320(1999), S. 167–174
- [111] Merklein, M.; Engel, U.; Noneder, J.: On the evaluation of strength of cold forged components made of high nitrogen steel. In: Wieland, H.-J.; TEMA Technologie Marketing AG (Hrsg.): SCT 2011 – 3rd International Conference on Steels in Cars and Trucks – Future trends in steel development, processing technologies and applications. *Stahleisen*, 2011, S. 58–65
- [112] Noneder, J.; Merklein, M.; Engel, U.; Egerer, E.; Frank, J.; Frank, M.; Ritzenhoff, R.: Hochleistungsbauteile durch Kaltmassivumformung hochfester, druckaufgestickter Stähle. *UTF-Science III*(2012), S. 1–28
- [113] Noneder, H.; Merklein, M.: Manufacturing of complex high strength components out of high nitrogen steels at industrial level. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* 22(2012), S. s512–s518
- [114] Andreas, K.; Kiener, C.; Engel, U.; Merklein, M.: Smart FE-Based Tool Design in Cold Forging. *Advanced Materials Research* 1018(2014), S. 309–316
- [115] Noneder, J.: Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen – Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2014

- [116] Herbertz, R.; Hermanns, H.; Labs, R.; Volz, H. U. (Hrsg.): Massivumformung kurz und bündig. Industrieverband Massivumformung, Hagen, 2013, Nachdruck April 2015
- [117] Engel, U.; Groenbaek, J.; Hinsel, C.; Kroiß, T.; Meidert, M.; Neher, R.; Räuchle, F.; Schrader, T.: Tooling solutions for challenges in cold forging. UTF-Science III(2011), S. 1–24
- [118] Engel, U.: Beanspruchung und Beanspruchbarkeit von Werkzeugen der Massivumformung. Meisenbach, Bamberg, 1996
- [119] Lange, K.: Umformtechnik – Handbuch für Industrie und Wissenschaft – Band 2: Massivumformung. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1988, 2., völlig Neubearb. Aufl.
- [120] Lange, K.; Cser, L.; Geiger, M.; Kals, J.A.G.: Tool Life and Tool Quality in Bulk Metal Forming. CIRP Annals 41(1992)2, S. 667–675
- [121] Lange, K.; Kammerer, M.; Pöhlant, K.; Schöck, J.: Fließpressen – Wirtschaftliche Fertigung metallischer Präzisionswerkstücke. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008
- [122] Andreas, K.; Noneder, J.; Engel, U.; Merklein, M.: Application of cemented carbide based forming tools in cold forging. In: Bouzakis, K.-D.; Bobzin, K.; Denkena, B.; Merklein, M. (Hrsg.): Proceedings of the 10th International Conference The "A" Coatings in Manufacturing Engineering, 10.-11. April 2013, Aachen. Shaker, Aachen, 2013, S. 159–169
- [123] Noneder, J.; Engel, U.; Merklein, M.: Tool design for cold forging of high nitrogen steels. In: Liewald, M. (Hrsg.): Proceedings of the 12th International Cold Forging Congress 2011. Institute for Metal Forming Technology, Stuttgart, 2011, S. 9–13
- [124] Uhe, B.; Kuball, C.-M.; Merklein, M.; Meschut, G.: Self-Piercing Riveting Using Rivets Made of Stainless Steel with High Strain Hardening: Daehn, G.; Cao, J.; Kinsey, B.; Tekkaya, A. E.; Vivek, A.; Yoshida, Y. (Hrsg.) 2021 – Forming the Future -Proceedings of the 13th International Conference on the Technology of Plasticity, S. 1495–1506
- [125] Ritzenhoff, R.; Diehl, V.: Manufacturing of HNS alloys at Energietechnik Essen GmbH – a process overview. In: Syvazhin, A. G.; Prokoshkina, V. G.; Kossyrev, K. L. (Hrsg.): Proceedings of 10th International Conference on High Nitrogen Steels, HNS 2009, 6.-8. Juli 2009, Moskau, Russland. MISIS, Moskau, Russland, 2009, S. 243–248

- [126] https://www.gmh-gruppe.de/fileadmin/user_upload/GMH_Group/o6_Unternehmenssteckbriefe/Energietechnik_Essen/Broschuere/Energietechnik-Essen-GmbH_Austenite-02-12.pdf (aufgerufen am 19.12.2023)
- [127] Energietechnik Essen GmbH: Herstellerangabe zur chemischen Zusammensetzung von P 900 N. Energietechnik Essen GmbH, 2018
- [128] Abnahmeprüfzeugnis 1.4541. Viraj Profiles Limited, 2016
- [129] Noneder, J.; Merklein, M.; Engel, U.: Vergleich verschiedener Verfahren zur Fließkurvenaufnahme im Hinblick auf die Prozess- und Werkzeugauslegung bei der Kaltmassivumformung druckaufgestickter Stähle. In: Kawalla, R. (Hrsg.): 2. Internationale Konferenz AutoMetForm und 17. Sächsische Fachtagung Umformtechnik SFU 2010, 2010, S. 333–345
- [130] DIN 50106:2016-11: Prüfung metallischer Werkstoffe – Druckversuch bei Raumtemperatur
- [131] <https://www.bleeble.com/resources/application-notes.html> (aufgerufen am 15.02.2022)
- [132] DIN EN ISO 10275:2020-12: Metallische Werkstoffe – Blech und Band – Bestimmung des Verfestigungsexponenten im Zugversuch (ISO 10275:2020); Deutsche Fassung EN ISO 10275:2020
- [133] Hockett, J. E.; Sherby, O. D.: Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperatures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 23(1975)2, S. 87–98
- [134] Ganesh Narayanan, R.; Gopal, M.; Rajadurai, A.: Influence of Friction in Simple Upsetting and Prediction of Hardness Distribution in a Cold Forged Product. *Journal of Testing and Evaluation* 36(2008)4, S. 1–13
- [135] Wibom, O.; Nielsen, J. A.; Bay, N.: Einfluss der Werkzeugtemperatur auf Reibung und Schmierung beim Kaltmassivumformen von Stahl. *Umformtechnik* 29(1995)2, S. 106–112
- [136] Male, A. T.; Cockroft, M. G.: A method for the determination of the coefficient of friction of metals under conditions of bulk plastic deformation. *Journal of the Institute of Metals* 93(1964), S. 38–46
- [137] Sofuoglu, H.; Rasty, J.: On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test. *Tribology International* 32(1999)6, S. 327–335

- [138] Tekkaya, A. E.: A guide for validation of fe-simulations in bulk metal forming. The Arabian Journal for Science and Engineering 30(2005)1C, S. 113–136
- [139] DIN EN ISO 14577-1:2015-11: Metallische Werkstoffe – Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter – Teil 1: Prüfverfahren (ISO 14577-1:2015); Deutsche Fassung EN ISO 14577-1:2015
- [140] Kroiß, T.; Engel, U.; Merklein, M.: Comprehensive approach for process modeling and optimization in cold forging considering interactions between process, tool and press. Journal of Materials Processing Technology 213(2013)7, S. 1118–1127
- [141] Czichos, H.; Saito, T.; Smith, L. R. (Hrsg.): Springer handbook of materials measurement methods. Springer Science+Business Media, Inc., 2006
- [142] Vollrath, K.; Heizmann, J. (Hrsg.): Simulation of forging processes. Forging Industry Information Service, Special Edition. Industrieverband Massivumformung, Hagen, 2013
- [143] DIN EN ISO 6507-1:2006-03: Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers – Teil 1: Prüfverfahren (ISO 6507-1:2005); Deutsche Fassung EN ISO 6507-1:2005
- [144] Danzl, R.; Helml, F.; Scherer, S.: Focus variation – A new technology for high resolution optical 3D surface metrology. The 10th International Conference of the Slovenian Society for Non-Destructive Testing "Application of Contemporary Non-Destructive Testing in Engineering, 1.-3. September 2009, Ljubljana, Slowenien, 2009, S. 484–491
- [145] Bauch, J.; Rosenkranz, R.: Physikalische Werkstoffdiagnostik – Ein Kompendium wichtiger Analytikmethoden für Ingenieure und Physiker. Springer Vieweg, Berlin, 2017
- [146] Kuball, C.-M.; Uhe, B.; Meschut, G.; Merklein, M.: Process design for the forming of semi-tubular self-piercing rivets made of high nitrogen steel. Procedia Manufacturing 50(2020), S. 280–285
- [147] Uhe, B.; Kuball, C.-M.; Merklein, M.; Meschut, G.: Approach for a sustainable process chain in manufacturing of fasteners for mechanical joining. Materials Research Proceedings 25(2023), S. 397–404
- [148] Haque, R.; Wong, Y. C.; Paradowska, A.; Blacket, S.; Durandet, Y.: SPR Characteristics Curve and Distribution of Residual Stress in Self-

- Piercing Riveted Joints of Steel Sheets. *Advances in Materials Science and Engineering* 2017(2017), S. 1–14
- [149] VDI 3166:1977-04: Halbwarmfließpressen von Stahl; Grundlagen
 - [150] Doege, E.; Meyer-Nolkemper, H.; Saeed, I.: Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe – mit Fließkurven für 73 Werkstoffe und einer grundlegenden Einführung. Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1986
 - [151] Kuball, C.-M.; Uhe, B.; Meschut, G.; Merklein, M.: Process-adapted temperature application within a two-stage rivet forming process for high nitrogen steel. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* 236(2022)6, S. 1285–1301
 - [152] International Cold Forging Group (ICFG): ICFG Doc. 6/82: General recommendations for design, manufacture and operational aspects of cold extrusion tools for steel components. Nachdruck in: *International Cold Forging Group ICFG 1967-1982 Objectives, History, Published Documents*, Meisenbach, Bamberg, 1992
 - [153] VDI 3176:1986-10: Vorgespannte Preßwerkzeuge für das Kaltmassivumformen
 - [154] Syska, A.: *Produktionsmanagement – Das A – Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute*. Gabler, Wiesbaden, 2006
 - [155] DIN EN10218-2:2012-03: Stahldraht und Drahterzeugnisse – Allgemeines – Teil 2: Drahtmaße und Toleranzen; Deutsche Fassung EN 10218-2:2012
 - [156] DIN4768:1990-05: Ermittlung der Rauheitskenngrößen R_a , R_z , R_{max} mit elektrischen Tastschnittgeräten; Begriffe, Meßbedingungen
 - [157] Lange, K.: *Umformtechnik – Handbuch für Industrie und Wissenschaft – Band 4: Sonderverfahren, Prozeßsimulation, Werkzeugtechnik, Produktion*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1993, 2., völlig Neubearb. und erw. Aufl.
 - [158] Uhe, B.; Kuball, C. M.; Merklein, M.; Meschut, G.: Influence of the Rivet Coating on the Friction during Self-Piercing Riveting. *Key Engineering Materials* 883(2021), S. 11–18

- [159] Kroiß, T.: Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung – Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2012
- [160] Uhe, B.; Kuball, C.-M.; Merklein, M.; Meschut, G.: Strength of self-piercing riveted joints with conventional rivets and rivets made of high nitrogen steel. 24th International ESAFORM Conference on Material Forming (ESAFORM 2021), 14.-16. April 2021, Liège, Belgien, 1911:1–8

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Kuball, C.-M.; Merklein, M.: Heating effect on the forming behaviour of high nitrogen steel in bulk forming. In: Galdos, L.; Arrazola, P.; Sáenz de Argandoña, E.; Otegi, N.; Mendiguren, J.; Madariaga, A.; Sáez de Buruaga, M. (Hrsg.): AIP Conference Proceedings 2113: Proceedings of the 22nd International ESAFORM Conference on Material Forming (ESAFORM 2019), AIP Publishing, 2019, 160004:1–6
- [P2] Kuball, C.-M.; Jung, R.; Uhe, B.; Meschut, G.; Merklein, M.: Influence of the process temperature on the tribological behaviour during bulk forming of high nitrogen steel. In: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Hrsg.) AJP 2019 – 1st International Conference on Advanced Joining Processes, Book of abstracts, 24.-25. Oktober 2019, Ponta Delgada, Azoren, Portugal. Quântica Editora, Lda., 2019, S. 29
- [P3] Kuball, C.-M.; Jung, R.; Uhe, B.; Meschut, G.; Merklein, M.: Influence of the process temperature on the forming behaviour and the friction during bulk forming of high nitrogen steel. Journal of Advanced Joining Processes 1(2020), 100023:1–9
- [P4] Uhe, B.; Kuball, C.-M.; Merklein, M.; Meschut, G.: Improvement of a rivet geometry for the self-piercing riveting of high-strength steel and multi-material joints. Production Engineering 14(2020)4, S. 417–423
- [P5] Kuball, C.-M.; Uhe, B.; Meschut, G.; Merklein, M.: Process design for the forming of semi-tubular self-piercing rivets made of high nitrogen steel. Procedia Manufacturing 50(2020), S. 280–285
- [P6] Wituschek, S.; Kuball, C.-M.; Merklein, M.; Lechner, M.: Test method for friction characterization of rivets. Defect and Diffusion Forum 404(2020), S. 132–137
- [P7] Uhe, B.; Kuball, C.-M.; Merklein, M.; Meschut, G.: Influence of the rivet coating on the friction during self-piercing riveting. Key Engineering Materials 883(2021), S. 11–18
- [P8] Uhe, B.; Kuball, C.-M.; Merklein, M.; Meschut, G.: Strength of self-piercing riveted joints with conventional rivets and rivets made of high nitrogen steel. 24th International ESAFORM Conference on Material Forming (ESAFORM 2021), 14.-16. April 2021, Liège, Belgien, 1911:1–8

- [P9] Hafenecker, J.; Kuball, C.-M.; Rothfelder, R.; Schmidt, M.; Merklein, M.: Surface modification of additively manufactured parts by forming. 24th International ESAFORM Conference on Material Forming (ESAFORM 2021), 14.-16. April 2021, Liège, Belgien, 2124:1–10
- [P10] Uhe, B.; Kuball, C.-M.; Merklein, M.; Meschut, G.: Self-piercing riveting using rivets made of stainless steel with high strain hardening. In: Daehn, G.; Cao, J.; Kinsey, B.; Tekkaya, E.; Vivek, A.; Yoshida, Y. (Hrsg.): Forming the Future. The Minerals, Metals & Materials Series. Springer, Cham, 2021, S. 1495–1506
- [P11] Kuball, C.-M.; Uhe, B.; Meschut, G.; Merklein, M.: Selective application of different forming temperatures for individual process stages in a rivet manufacturing process with high nitrogen steel. In: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (Hrsg.) AJP 2021 – 2nd International Conference on Advanced Joining Processes, Book of abstracts, 21.-22. Oktober 2021, Sintra, Portugal. Quântica Editora, Lda., 2021, S. 29
- [P12] Kuball, C.-M.; Uhe, B.; Meschut, G.; Merklein, M.: Process-adapted temperature application within a two-stage rivet forming process for high nitrogen steel. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications 236(2022)6, S. 1285–1301
- [P13] Meschut, G.; Merklein, M.; Brosius, A.; Drummer, D.; Fratini, L.; Füssel, U.; Gude, M.; Homberg, W.; Martins, P.A.F.; Bobbert, M.; Lechner, M.; Kupfer, R.; Gröger, B.; Han, D.; Kalich, J.; Kappe, F.; Kleffel, T.; Köhler, D.; Kuball, C.-M.; Popp, J.; Römisch, D.; Troschitz, J.; Wischer, C.; Wituschek, S.; Wolf, M.: Review on mechanical joining by plastic deformation. Journal of Advanced Joining Processes 5(2022), 100113:1–27
- [P14] Uhe, B.; Kuball, C.-M.; Merklein, M.; Meschut, G.: Approach for a sustainable process chain in manufacturing of fasteners for mechanical joining. Materials Research Proceedings 25(2023), S. 397–404
- [P15] Merklein, M.; Jäckisch, M.; Kuball, C.-M.; Römisch, D.; Wiesenmayer, S.; Wituschek, S.: Mechanical joining of high-strength multi-material systems – trends and innovations. Mechanics & Industry 24(2023)16, S. 1–20

- [P16] Uhe, B.; Kuball, C.-M.; Merklein, M.; Meschut, G.: Increased sustainability in fastener production with the example of self-piercing rivets. *Journal of Manufacturing and Materials Processing* 7(2023)6, S. 1–11
- [P17] Uhe, B.; Kuball, C.-M.; Merklein, M.; Meschut, G.: Controlled rivet deformation during self-piercing riveting through a tailored strength distribution within the rivet material. In: Mocellin, K.; Bouchard, P.O.; Bigot, R.; Balan, T. (Hrsg.): *Proceedings of the 14th International Conference on the Technology of Plasticity - Current Trends in the Technology of Plasticity. ICTP 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, 2024, S. 64–71

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- [S1] Jung, R.O.: Charakterisierung von Werkstoffen für die Herstellung von Halbhohlstanznietelementen. Bachelorarbeit, Erlangen, 2019
- [S2] Christian, P.: Simulative Analyse des Einflusses der Nietgeometrie bei der Herstellung von Halbhohlstanznieten. Bachelorarbeit, Erlangen, 2019
- [S3] Würth, P.: Entwicklung von Werkzeugkonzepten für die Herstellung von Halbhohlstanznietelementen im mehrstufigen Kaltumformprozess. Masterarbeit, Erlangen, 2019
- [S4] Pecoraro, G.: Analysis of the forming process of self-piercing rivets made of high nitrogen steel. Bachelorarbeit, Erlangen, 2020
- [S5] Suda, P.J.: Analyse des Einflusses der Umformtemperatur bei der Herstellung von Halbhohlstanznieten aus druckaufgesticktem Stahl. Projektarbeit, Erlangen, 2021
- [S6] Götz, T.: Grundlegende Evaluation des Potentials zur additiven Herstellung von Halbhohlstanznieten mit bionischen und belastungsangepassten Strukturen. Bachelorarbeit, Erlangen, 2022
- [S7] Graßmann, K.I.K.: Untersuchung des Einflusses von Prozessschwankungen bei der umformtechnischen Herstellung von Halbhohlstanznieten aus druckaufgesticktem Stahl. Bachelorarbeit, Erlangen, 2022

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2024):
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307
Fertigungstechnik – Erlangen
ISSN 1431-6226
Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308
FAU Studien aus dem Maschinenbau
ISSN 2625-9974
FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
FMT	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
KTmflk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LGT	Lehrstuhl für Gießereitechnik
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien
REP	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

Band 1: Andreas Hemberger

Innovationspotentiale in der rechnerintegrierten Produktion durch wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe

Beitrag zur Steigerung der Flexibilität automatisierter Montagesysteme durch Sensorintegration und erweiterte Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting

Projektiertung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989. ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter

Nutzungsgradsteigerung von Montagesystemen durch den Einsatz der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin

Aufbau von Modellen zur Lageregelung von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss

Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989. ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz

Modell zur datenbankgestützten Planung automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier

Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989. ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele

Konzeption und Wirtschaftlichkeit von Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer

Technologisch orientierte Montageplanung am Beispiel der Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990. ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer

Verteilte Planungssysteme zur Flexibilitätsteigerung der rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam

CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen

Pulvermetallurgische Verarbeitung eines übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler

Material- und Datenfluß in einer flexiblen Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991. ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake

Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991. ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel

Optimierung der Werkzeugbereitstellung durch rechnergestützte Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991. ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller

Modellierung und Einsatz von Softwaresystemen für rechnergeführte Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende

Untersuchungen zum Biegeumformung mit elastischer Matrizierung
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991. ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid

Beitrag zum automatisierten Bearbeiten von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer

Multiprozessorsteuerung für kooperierende Industrieroboter in Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer

Entwicklung problemspezifischer Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr

Beitrag zur optimalen Verbindungstechnik in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief

Untersuchungen zur Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 1991. ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim

Rechnerunterstützte Optimierung von Materialflußstrukturen in der Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller

CO₂-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992. ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann

Entwicklung einer CAD/CAM-Prozesskette für die Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch

Planungs- und Steuerungswerkzeuge zur impliziten Geräteprogrammierung in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther

Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless

Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmman

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra

Entwicklung eines benutzerorientierten Werkstattprogrammiersystems für das Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993. ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels

Modellierung und Optimierung von Montageanlagen in einem integrierten Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Heibel

Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz

Oberflächenfeinbearbeitung keramischer Werkstoffe mit XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994. ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp

Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssoftware von SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch

Wissensbasierte Unterstützung der Angebotsbearbeitung in der Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp

Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim Schneiden mit einem gepulsten Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995. ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel

Optische 3D-Konturerfassung und on-line Biegewinkelmessung mit dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995. ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt

Modulares Planungssystem zur Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner

Adaptive Diagnose in der Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann

Beitrag zur automatisierten Handhabungsplanung komplexer Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995. ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf

Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher

Konzept zur rechnerintegrierten Materialversorgung in flexiblen Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska

Wissensbasierte Analyse und Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke

Integrierte Entwicklung neuer Produkt- und Produktionstechnologien für räumliche spritzgegossene Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995. ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie

Zeitbehandlung und Multimedia-Unterstützung in Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996. ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel

Reengineering in der Elektro- und Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996. ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn

Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen

LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab.

1996. ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth

Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik

LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.

1996. ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr

Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden Robotern

FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab.

1996. ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer

Berührungslose Formgebung mit-Laserstrahlung

LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.

1996. ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz

Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen

LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab.

1997. ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs

Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell

FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab.

1997. ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm

Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion

FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.

1997. ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand

Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)

FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.

ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf

Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparsparameter einer CO₂-Hochleistungslaseranlage

LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.

1997. ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser

Modulares Informationsmanagement in der integrierten Produkt- und Prozeßplanung

FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.

ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl

Integriertes Automatisierungskonzept für den flexiblen Materialfluß in der Elektronikproduktion

FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab.

1997. ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto

Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen

LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab.

1997. ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl

Erweiterte Informationsbereitstellung an offenen CNC-Steuerungen zur Prozeß- und Programmoptimierung

FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.

ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf

Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulenvickeln

FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.

ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes

Technologieorientierte Bahnplanung für die 3D-Laserstrahlbearbeitung

LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab.

1997. ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus

Laserstrahlumformen von Profilen

LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab.

1997. ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer

Adaptive Strahlführungen für CO₂-Lasieranlagen

LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab.

1997. ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber

Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage

FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab.

1997. ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf

Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik

LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab.

1997. ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke

Integrierte Planung und Konstruktion von Werkzeugen für die Biegebearbeitung

LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.

ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller

Automatisierte Demontagesysteme und recyclinggerechte Produktgestaltung elektronischer Baugruppen

FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17

Tab. 1998. ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner

Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung

LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab.

1998. ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher

Prozeß- und Systemtechnik zum Laserstrahl-Mikroschweißen

LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab.

1998. ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind

Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren

LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab.

1998. ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard

Qualitätssteigerung in der Elektronikproduktion durch Optimierung der Prozeßführung beim Löten komplexer Baugruppen

FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab.

1998. ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh

Methodische Einbindung der Simulation in die betrieblichen Planungs- und Entscheidungsabläufe

FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab.

1998. ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn

Meßeinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab.
1998. ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schuberth

Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO₂-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab.
1998. ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo

Development and Implementation of Hierarchical Control Structures of Flexible Production Systems Using High Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt

Effizienzsteigerung bei Demontage und Recycling durch flexible Demontagetechnologien und optimierte Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz

Modelle und effiziente Modellbildung zur Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998. ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs

Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998. ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau

Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.
1999. ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn

Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab.
1999. ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger

Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab.
1999. ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher

Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab.
1999. ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet

Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart

Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab.
1999. ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P.

Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab.
1999. ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler

Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker

Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab.
1999. ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein

Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab.
1999. ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger

Herstellungs- und Prüfverfahren für thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab.
1999. ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach

Beitrag zur rechnerunterstützten verursachungsgerechten Angebotskalkulation von Blechteilen mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab.
1999. ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach

Bildverarbeitungssystem zur Erfassung der Anschlußgeometrie elektronischer SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2000. ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk

Simulationsbasierte Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab.
2000. ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl

Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000. ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel

Ermüdungsbruchversagen hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab.
2000. ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer

Modulares Planungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder, 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige

Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder, 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel

Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel

Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter

Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli

Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller

Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern - Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer

Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein

Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger

Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber

Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi

Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein

Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi

Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch

Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt

Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler

Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche

Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel

Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel

Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer

Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein

Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann

Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich

Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab.
2002. ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch

3 - D MID Technologie in der Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab.
2002. ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl

Fertigungsqualität und Umformbarkeit laserstrahlgeschweißter Formplatinen aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab.
2002. ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk

Entwicklung eines konfigurierbaren Steuerungssystems für die flexible Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab.
2002. ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Nегendanck

Neue Sensorik und Aktorik für Bearbeitungsköpfe zum Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab.
2002. ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab.
2002. ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier

Strategien für einen produktorientierten Einsatz räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2002. ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich

Kostensimulation - Simulationsbasierte Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab.
2002. ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny

Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab.
2002. ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab.
2003. ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth

Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und Verbindungstechnik für mechatronische Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph

Durchgängige simulationsgestützte Planung von Fertigungseinrichtungen der Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab.
2003. ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah

Simulationsbasierte Bestimmung der zu erwartenden Maßhaltigkeit für das Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab.
2003. ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein

Scherschneiden und Biegen metallischer Kleinstteile - Materialeinfluss und Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab.
2003. ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff

Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2003. ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach

Rechnergestützte Anpassung von Laserstrahlschneidbahnen an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.
2004. ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl

System- und Prozesstechnik für das simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab.
2004. ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker

Tribologische Eigenschaften keramischer Blechumformwerkzeuge - Einfluss einer Oberflächenendbearbeitung mittels Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab.
2004. ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger

Prozessoptimierung in der Wickeltechnik durch innovative maschinenbauliche und regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama

Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab.
2004. ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm

Laserstrahljustieren mittels Aktoren - Entwicklung von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung und Optimierung von komplexen Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab.
2004. ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung: Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab.
2004. ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und Regelsysteme für die adaptive Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab.
2004. ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab.
2005. ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinstteile bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab.
2005. ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung von Qualität und Zuverlässigkeit in der Fertigung hochintegrierter Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab.
2005. ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit Elastomerwerkzeugen Modellierung, Prozessauslegung und Abgrenzung des Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab.
2005. ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trockenschmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Triologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab.
2005. ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of Assembly Systems in Three-Dimensional Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung elektronischer Baugruppen auf der Basis flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab.
2005. ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab.
2005. ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung einer varianz- und kostenoptimierten Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab.
2005. ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessanalyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab.
2005. ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung von Leichtbauverbundstrukturen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.
2005. ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimierung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab.
2005. ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management in der integrierten virtuellen Entwicklung der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab.
2005. ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.
2005. ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab.
2005. ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab.
2006. ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtel
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab.
2006. ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab.
2006. ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab.
2006. ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab.
2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für blei-freie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.

ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods

LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp

Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel

Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl

Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schalungsträger (3D-MID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang

Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten
FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge
LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch

Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplattinen
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber

Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick

Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahl-schweißen von Kunststoffen
LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi

Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff

Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5
LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Lötprozessen in der Elektronikproduktion
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze

Automatisierte Montage von makromechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetze
FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter

Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließortkurven bei erhöhten Temperaturen
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab.
2008. ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth

Grundlegende Untersuchungen zum Excimerlaserstrahl-Abtragen unter Flüssigkeitsfilmen
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab.
2008. ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera

Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreißschweißen metallischer Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab.
2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler

Beschreibung und Modellierung des Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl

Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller

Modellierung eines nachfrageorientierten Produktionskonzeptes für mobile Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf

Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessmissionen beim Laserstrahl-tiefschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf

Entwicklung eines agentenbasierten Steuerungssystems zur Materialflussorganisation im wandelbaren Produktionsumfeld
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder.
2009. ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster

Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfel

Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt

Seriennahe Auslegung von Aluminium Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann

Qualitative und quantitative Bewertung der Crashtauglichkeit von höchstfesten Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab.
2009. ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl

Größeneffekte bei Biegeprozessen-Entwicklung einer Methodik zur Identifikation und Quantifizierung
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud

Effiziente Prozesskettenauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter und geschweißter Aluminiumbleche
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel

Grundlegende Untersuchungen zum Kontaktzustand zwischen Werkstück und Werkzeug bei umformtechnischen Prozessen unter tribologischen Gesichtspunkten
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betaung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler

Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innenhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke

Mehrriterielle Optimierung komplexer Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab.
2010. ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte
FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam
Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery
LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch
Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion
FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald
Quasi-isothermes Laserstrahlinsitern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan
Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern
FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner
Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen
LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber
Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuer
Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften: Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung
LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak
Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics
LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz
Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen
LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm
Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik
LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß
Modellbasierte Prozessauslegung für die Kaltmassivumformung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung
LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth
Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler
Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie
FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert
Automatisiertes Laserstrahlhüten und -reparaturhüten elektronischer Baugruppen
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr
Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler
Prozessdynamik beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger
Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel
Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade
In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse
Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens
LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab.
2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen auf die Verarbeitungsgrenzen von Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab.
2013. ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften widerstandspunktesgeschweißter Aluminium-Stahl-Verbindungen für den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren auf die Wirbelstromverluste von Stator-Einzelzahnblechpaketen für den Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von Blechhalbzeugen unter Anwendung magnetorheologischer Flüssigkeiten als kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühn
Flexible Automatisierung der Statormontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien für Rotoren getriebeintegrierter PM-Synchronmotoren von Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for Contactless Power Transfer Systems for Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder.
2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab.
2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab.
2014. ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahl-tiefschweißprozesses durch Detektion der Metall dampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke

Transiente physikalische Mechanismen bei der Laserablation von dünnen Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz

Community-basierte Optimierung des Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen

Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aus-härtbarer Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec

Untersuchungen zur Herstellung von funktionsoptimierten Bauteilen im partiellen Presshärteprozess mittels lokal unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader

Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland

Entwicklung einer Methode zur Prognose adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm

Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner

Herstellung beanspruchungsangepasster Aluminiumblechhalbzeuge durch eine maßgeschneiderte Variation der Abkühlgeschwindigkeit nach Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas

Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum

Laser Consolidation of ITO Nanoparticles for the Generation of Thin Conductive Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider

Umformtechnische Herstellung dünnwandiger Funktionsbauteile aus Feinblech durch Verfahren der Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof

Sematische Modellierung automatisierter Produktionssysteme zur Verbesserung der IT-Integration zwischen Anlagen-Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab.
2015. ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller

Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des tribologischen Systems in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler

Einsatz technologischer Versuche zur Erweiterung der Versagensvorhersage bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig

Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl

Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold

Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger

Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl
Methods-Energy Measurement -
Eine Methode zur Energieplanung
für Fügeverfahren im Karosserie-
bau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unterneh-
menscontrollings um die Dimen-
sion Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen
zur Herstellung zyklisch-symmet-
rischer Bauteile mit Nebenform-
elementen durch Blechmassivum-
formung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

**Band 288: Hans Ulrich Vierzig-
mann**
Beitrag zur Untersuchung der tri-
bologischen Bedingungen in der
Blechmassivumformung - Bereit-
stellung von tribologischen Mod-
ellversuchen und Realisierung
von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absiche-
rung der formgebenden Operation
des Nasspressprozesses von Ge-
lege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische
Mindestenergiebedarf als Refe-
renzwert zur Bewertung der Ener-
gieeffizienz in der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab.
2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen ver-
zinkter Stahlbleche in Kehlnahtge-
ometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

**Band 292: Alexander Kahrma-
nidis**
Thermisch unterstützte Umfor-
mung von Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent
Magnet Assembly and Magnetic
Rotor Measurement / Flexible Sys-
teme zur Montage von Permanent-
magneten und zur Messung mag-
netischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab.
2016. ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensver-
halten hochfester Leichtbauwerk-
stoffe unter Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen
zum Prozessverhalten von Silizium
als Werkzeugwerkstoff für das
Mikroscherschneiden metallischer
Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

**Band 296: Sasia Mareike Hert-
weck**
Zeitliche Pulsformung in der La-
sermikromaterialbearbeitung -
Grundlegende Untersuchungen
und Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach
for the Process Planning of En-
ergy-Efficient Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großserientaugliche Nadelwickel-
technik für verteilte Wicklungen
im Anwendungsfall der E-Trakti-
onsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20
Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstel-
lung montageführender Werkerin-
formationssysteme simultan zum
Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab.
2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung
und Regelung robotergeführter
Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen
Werkstoffverbunden mittels si-
multanem, intensitätsselektivem
Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch un-
terstützten Fertigungskette zur
Herstellung umgeformter Bauteile
aus der härtesten Aluminiumle-
gierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellin
Design of Manufacturing Processes
for the Cold Bulk Forming of Small
Metal Components from Metal
Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Mode-
ling, Simulation and Optimization
of Molded Interconnect Devices
(MID) Based on Laser Direct
Structuring (LDS) / Experimentelle
Untersuchung, Modellierung, Si-
mulation und Optimierung von
Molded Interconnect Devices
(MID) basierend auf Laser Direkt-
strukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26
Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsver-
fahren für flachleiterbasierte Pkw-
Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab.
2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner
Charakterisierung und Modellierung des Spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar
A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler
Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller
Untersuchung des kombinierten Trenn- und Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinverfahren LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vivapc
Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer
Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer
Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner
Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja
Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub
Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel
Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand
Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad
Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserie-rohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel
Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann
Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann
Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner
Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller
Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTMfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz
Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnibl
Modellbasierte Prozesskettenabbildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner

Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher

FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm

Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge

LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer

Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip

LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp

Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transients optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung

LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz

Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten

FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner

Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung

FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger

Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion

KTMfK, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019.

ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn

Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)

FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019.

ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann

Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme

FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab. 2019.

ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski

Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung

LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019.

ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier

Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion

FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020.

ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr

Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen

LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020.

ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener

Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern

LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng

Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißschweißprozesses

FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl

Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten

LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti

Evaluation of failure behaviour of sheet metals

LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner

Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umform- und Abschreckprozess

LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner

Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen

FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter

Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente

FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser

Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation

FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020.

ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend

Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder. 2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert

Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung KTMfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander

Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten KTMfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

Band 350: Florian Pilz

Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

Band 351: Sebastian Josef Katona

Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometrie-modelle KTMfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

Band 352: Jürgen Herrmann

Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014 LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

Band 353: Christof Küstner

Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung KTMfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

Band 354: Tobias Gläsel

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobiler Traktionsantriebe FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel

Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern KTMfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

Band 356: Hannah Riedle

Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

Band 357: Maximilian Landgraf

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

Band 358: Alireza Esfandiyari

Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

Band 359: Christian Sand

Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

Band 360: Ralf Merk

Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

Band 361: Thomas Reitberger

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

Band 362: Marius Christian Fechter

Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion KTMfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

Band 363: Franziska Neubauer

Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäfer

Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

Band 366: Daniel Junker

Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

Band 367: Tallal Javied

Totally Integrated Ecology Management for Resource Efficient and Eco-Friendly Production FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

Band 368: David Marco Hochrein

Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axialschub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen – KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf

Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie
FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-433-2.

Band 370: Andreas Gröschl

Hochfrequent fokusabstandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik
FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-435-6.

Band 371: Johann Tüchsen

Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren
KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-437-0.

Band 372: Max Marian

Numerische Auslegung von Oberflächenmikrotexturen für geschmierte tribologische Kontakte
KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-439-4.

Band 373: Johannes Strauß

Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung
LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder. 2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

Band 374: Martin Hohmann

Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy
LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-445-5.

Band 375: Timo Kordaß

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen
FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-443-1.

Band 376: Philipp Kestel

Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen
KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-457-8.

Band 377: Martin Lerchen

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen
FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-463-9.

Band 378: Michael Schneider

Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten
FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-465-3.

Band 379: Tobias Sprügel

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering
KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-475-2.

Band 380: Tom Häfner

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen
LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-479-0.

Band 381: Björn Heling

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design
KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-487-5.

Band 382: Tobias Kolb

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems
LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021.
ISBN 978-3-96147-491-2.

Band 383: Mario Meinhardt

Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit
LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-473-8.

Band 384: Felix Bauer

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik
LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-498-1.

Band 385: Jochen Zeitler

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen
FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-499-8.

Band 386: Vincent Mann

Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle
LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-503-2.

Band 387: Chen Chen

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies

LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-505-6.

Band 388: Stefan Stein

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements

LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-507-0

Band 389: Nikolaus Urban

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten

FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-501-8.

Band 390: Yiting Wu

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022.

ISBN: 978-3-96147-513-1.

Band 391: Thomas Papke

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur

LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-515-5.

Band 392: Bastian Zimmermann

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht

LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-519-3.

Band 393: Harald Völkl

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen

KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-523-0.

Band 394: Robert Schulte

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-525-4.

Band 395: Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile

LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-534-6.

Band 396: Thomas Johann Luft

Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme

KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-540-7.

Band 397: Li Wang

Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen

FAPS, xxii u. 151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-542-1.

Band 398: Sebastian Reitelshöfer

Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten

FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-547-6.

Band 399: Alexander Meyer

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-555-1.

Band 400: Rong Zhao

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte

KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-557-5.

Band 401: Christian P. J. Schwarzer

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik

FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-566-7.

Band 402: Alexander Horn

Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung

LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-568-1.

Band 403: Artur Klos

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau

LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-572-8.

Band 404: Harald Schmid

Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehsticks auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen

LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-577-3.

Band 405: Johannes Henneberg

Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial

LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-579-7.

Band 406: Anton Schmailzl

Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlschweißen

LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-583-4.

Band 407: Alexander Wolf
Modellierung und Vorhersage menschlichen Interaktionsverhaltens zur Analyse der Mensch-Produkt Interaktion
KTmfk, x u. 207 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-585-8.

Band 408: Tim Weikert
Modifikationen amorpher Kohlenstoffschichten zur Anpassung der Reibungsbedingungen und zur Erhöhung des Verschleißschutzes
KTmfk, xvii u. 258 Seiten, 91 Bilder, 9 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-589-6.

Band 409: Stefan Götz
Frühzeitiges konstruktionsbegleitendes Toleranzmanagement
KTmfk, ix u. 276 Seiten, 127 Bilder, 13 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-593-3.

Band 410: Markus Hubert
Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte
FAPS, xviii u. 139 Seiten, 86 Bilder, 7 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-603-9.

Band 411: Manfred Vogel
Grundlagenuntersuchungen und Erarbeitung einer Methodik zur Herstellung maßgeschneiderter Halbzeuge auf Basis eines neuartigen flexiblen Walzprozesses
LFT, ix u. 176 Seiten, 61 Bilder, 11 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-605-3.

Band 412: Michael Weigelt
Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität
FAPS, xv u. 222 Seiten, 89 Bilder, 38 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-607-7.

Band 413: Frank Bodendorf
Machine Learning im Cost Engineering des Supply Managements
FAPS, xiii u. 165 Seiten, 75 Bilder, 13 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-609-1.

Band 414: Maximilian Metzner
Planung und Simulation taktiler, intelligenter und kollaborativer Roboterfähigkeiten in der Montage
FAPS, xix u. 174 Seiten, 72 Bilder, 3 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-611-4.

Band 415: Tina Buker
Ein Ansatz zur Reduktion produktinduzierter Nutzerstigmatisierung durch Förderung einer gleichermaßen gebrauchstauglichen wie emotionalen Produktgestalt
KTmfk, x u. 236 Seiten, 54 Bilder, 44 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-613-8.

Band 416: Marlene Kuhn
Model-based Traceability System Development for Complex Manufacturing Applying Blockchain and Graphs
FAPS, xv u. 167 Seiten, 63 Bilder, 10 Tab. 2022.
ISBN 978-3-96147-615-2.

Band 417: Benjamin Lengenfelder
Remote photoacoustic sensing using speckle-analysis for biomedical imaging
LPT, xv u. 124 Seiten, 86 Bilder, 10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-617-6.

Band 418: Benjamin Pohrer
Analyse des Zusammenhangs zwischen dem tribochemischen Aufbau von Grenzschichten und der Ausbildung von White Etching Crack-Schäden
KTmfk, xv u. 258 Seiten, 103 Bilder, 10 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-621-3.

Band 419: Matthias Friedlein
Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte
FAPS, xxv u. 162 Seiten, 98 Bilder, 7 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-625-1.

Band 420: Thomas Stoll
Laser Powder Bed Fusion von Kupfer auf Aluminiumoxid-Keramik
FAPS, xxvii u. 236 Seiten, 103 Bilder, 11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-631-2.

Band 421: Eric Eschner
Relation of Particle Motion and Process Zone Formation as a Basis for Sensing Approaches within PBF-LB/M
LPT, xiv u. 143 Seiten, 87 Bilder, 0 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-633-6.

Band 422: Fanuel Mehari
Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) as a diagnostics tool for biological tissue analysis.
LPT, xv u. 145 Seiten, 68 Bilder, 12 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-641-1.

Band 423: Uwe Leicht
Ultraschallüberlagertes Umformen und Verstemmen von Stahlwerkstoffen
LFT, xi u. 165 Seiten, 65 Bilder, 6 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-643-5.

Band 424: Thomas Braun
Potenzialanalyse der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau
FAPS, xvii u. 152 Seiten, 72 Bilder, 11 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-653-4.

Band 425: Reinhardt Seidel
Modellbasierte Optimierung des Selektivwellenlötprozesses
FAPS, xxii u. 167 Seiten, 73 Bilder, 23 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-651-0.

Band 426: Matthias Lenzen
Maßgeschneiderte Werkstoffcharakterisierung für die numerische Auslegung von Blechumformprozessen
LFT, xi u. 187 Seiten, 77 Bilder, 13 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-663-3.

Band 427: Matthias Graser
Analyse lokaler Kurzzeitwärmebehandlungsmethoden zur Verbesserung des Umformverhaltens und der Bauteileigenschaften von Aluminiumstrangpresshohlprofilen
LFT, xi u. 169 Seiten, 81 Bilder, 1 Tab. 2023.
ISBN: 978-3-96147-666-4.

Band 428: Markus Lieret

Sicheres autonomes Flugroboter-system für den Einsatz im Produktions- und Logistikumfeld
FAPS, xix u. 198 Seiten, 54 Bilder, 7 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-668-8.

Band 429: Petar Vukovic

Simulation komplexer Kommunikationssysteme in der Fertigungs-automatisierung
FAPS, xiv u. 163 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2023.
ISBN 978-3-96147-673-2.

Band 430: Fabian Knieps

Finite Elemente Simulation dünns-ter Verpackungsstähle: Entwick- lung einer geeigneten Charakteri- sierungs- und Validierungsstrate- gie
LFT, xix, 189 Seiten, 122 Bilder, 17 Tab. 2023
ISBN 978-3-96147-689-3

Band 431: Julian Seßner

Multimodale Bildsegmentierung gering strukturierter Umgebungen für die Navigation am Beispiel eines Assistenzsystems für sehbe- einträchtigte Personen
FAPS, xxv, 203 Seiten, 57 Bilder, 25 Tab. 2023
ISBN 978-3-96147-697-8

Band 432: Benjamin Samuel

Lutz

Smart Manufacturing System for Process Optimization Regarding Deviations among Material Batches
FAPS, xix, 208 Seiten, 77 Bilder, 14 Tab. 2023
ISBN 978-3-96147-703-6

Band 433: Michael Jüttner

Bewertung von Kantenpressungen auf Basis von Simulationen mehr- fach überrollter elasto-plastischer Kontakte
KTmflk, xii, 162 Seiten, 59 Bilder, 7 Tab. 2024
ISBN 978-3-96147-713-5

Band 434: Sebastian Wiesen- mayer

Untersuchungen zur Stofffluss- steuerung beim Fügen durch Um- formen von hochfesten Alumini- umlegierungen mittels lokaler Kurzzeitwärmebehandlung
LFT, xii u. 197 S., 81 Bilder, 19 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-715-9.

Band 435: Clara-Maria Kuball

Grundlegende Untersuchungen zur umformtechnischen Herstel- lung von Halbhohlstanzen aus hochverfestigenden Werkstoffen
LFT, viii, 180 Seiten, 64 Bilder, 13 Tab. 2024.
ISBN 978-3-96147-717-3.

Abstract

Against the background of the relevance of environmental protection, the transformation towards highly efficient, sustainable production processes has begun. Semi-tubular self-piercing riveting is a mechanical joining technology that is essential for the realisation of lightweight and multi material design. However, rivet production is energy-intensive, time-consuming and costly due to the necessary heat treatment and coating of the rivets. The use of high strain hardening stainless rivet materials makes the post treatment obsolete. Due to the high tool loads, the forming of such steels represents a major challenge, which is why a comprehensive understanding of the process is required.

The aim of this work was therefore to gain a basic process understanding for the forming of rivets using high strain hardening rivet materials. The main focus was on the identification and analysis of process- and material-related influencing variables on the forming process and the resulting rivet properties, which was realised on the basis of a combined experimental-numerical approach. The feasibility of manufacturing rivets from high strain hardening materials was proven. While conventional rivets exhibit homogeneous properties due to the heat treatment, the new rivets are characterised by graded mechanical properties. Thus, a basis for the production of rivets with tailored properties, which could be adapted according to the requirements of the joining process, has been created.

Vor dem Hintergrund der Relevanz des Klimaschutzes hat die Transformation hin zu hocheffizienten, nachhaltigen Produktionsprozessen begonnen. Das Halbhohlstanzen ist ein mechanisches Fügeverfahren, welches für die Realisierung von Leichtbau und Mischbauweisen von Bedeutung ist. Die Nietherstellung ist allerdings aufgrund der erforderlichen Wärmebehandlung und Beschichtung der Niete energie-, zeit- und kostenintensiv. Durch den Einsatz hochverfestigender nichtrostender Nietwerkstoffe wird die Nachbehandlung obsolet. Aufgrund der hohen Werkzeugbeanspruchung stellt die Umformung derartiger Stähle eine Herausforderung dar, weshalb ein umfassendes Prozessverständnis erforderlich ist.

Das Ziel dieser Arbeit war daher die Erarbeitung eines grundlegenden Prozessverständnisses für die umformtechnische Herstellung von Nieten aus hochverfestigenden Werkstoffen. Schwerpunkte bildeten hierbei die Identifikation und Analyse von prozess- und werkstoffseitigen Einflussgrößen auf den Umformprozess und die Bauteileigenschaften. Dies erfolgte auf Basis eines kombinierten experimentell-numerischen Ansatzes. Der Machbarkeitsnachweis für die Herstellung von Nieten aus hochverfestigenden Werkstoffen wurde erbracht. Während bei konventionellen Nieten infolge der Wärmebehandlung homogene Eigenschaften vorliegen, weisen die neuen Niete gradierte mechanische Eigenschaften auf. Somit wurde eine Ausgangsbasis für die Herstellung von Nieten mit für das Fügen maßgeschneiderten Eigenschaften geschaffen.

