



FAU Studien aus dem Maschinenbau 395

Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung
metallischer Einleger im Folgeverbund
für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile

Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im
Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 395

Herausgeber der Reihe:

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. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Philipp Frey

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall- Hybridbauteile

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

Erlangen
FAU University Press
2022

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.

Bitte zitieren als

Frey, Philipp. 2022. *Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 395. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-535-3.

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 den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

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

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-534-6 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-535-3 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-535-3

**Umformtechnische Strukturierung
metallischer Einleger im Folgeverbund für
mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile**

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

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Philipp Frey, M.Sc.

aus Nördlingen

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

Tag der mündlichen

Prüfung: 12.05.2021

Vorsitzender des

Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Paul Fröba

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Zeitraum während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU). Wesentliche Aspekte dieser Arbeit basieren auf den Erkenntnissen aus dem Forschungsprojekt „Grundlagenuntersuchung zum Trennen, Umformen und Montagespritzguss und deren Interdependenz für die Herstellung beständig mediendichter elektronischer Systeme“, welches durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wurde. Für die Unterstützung möchte ich mich herzlich bedanken.

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein, welche als Ordinaria des LFT die wissenschaftliche Betreuung meiner Arbeit übernommen hat. Darüber hinaus bin ich ihr sehr verbunden, dass sie mir die fachliche und persönliche Weiterentwicklung als Leiter der Gruppe Fertigungsprozesse ermöglicht hat und stets gestalterischen Freiraum geboten hat. Desweitem bedanke ich mich recht herzlich bei Prof. Dr.-Ing. Dietmar Drummer für die Übernahme des Zweitgutachtens und dem Interesse an meiner Arbeit sowie die langjährige sehr gute Zusammenarbeit im oben genannten Forschungsprojekt. Weiter bedanke ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Ingo Hahn als fachfremden Gutachter und bei Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Inf. Hinnerk Hagenah als Prüfungsvorsitzender.

Mein persönlicher Dank gilt Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Univ. Michael Lechner für den intensiven fachlichen Austausch, die facettenreiche produktive Zusammenarbeit und die Begleitung der vorliegenden Arbeit. Ebenso bedanke ich mich bei meinem Projektpartner Dipl.-Ing. Tobias Kleffel vom Lehrstuhl für Kunststofftechnik (LKT) für die sehr gute Kooperation, die den umfangreichen Erkenntnisgewinn ermöglicht hat. Weiterhin gilt mein Dank meinen Kolleginnen und Kollegen und Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am LFT, die mit fachlichen Diskussionen und regem Austausch meinen Weg bereichert und mich inspiriert haben und dadurch zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie, welche mich immerzu bedingungslos unterstützt hat und mir stets Halt, Kraft und Liebe geboten hat und somit das unersetzliche Fundament meines Lebens bildet.

Erlangen, im Februar 2022

Philipp Frey

Inhaltsverzeichnis

	Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	vii
1	Einleitung	1
2	Stand der Technik und Forschung	3
2.1	Kunststoff-Metall-Hybridbauteile und Dichtheit	3
2.1.1	Kunststoff-Metall-Hybridbauteile	3
2.1.2	Dichtheit bei Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen	6
2.2	Folgeverbundprozesse.....	16
2.3	Scherschneiden.....	18
2.4	Prägen	28
2.4.1	Mikroprägen und Prägen	30
2.4.2	Kantenprägen	37
2.4.3	Flachstauchversuch	38
2.5	Zusammenfassende Bewertung des Stands der Technik und Forschung	42
3	Zielsetzung und methodische Vorgehensweise	45
4	Versuchseinrichtungen, Werkstoffe, Prüfverfahren und Methoden	47
4.1	Versuchseinrichtungen	47
4.1.1	Universalprüfmaschinen	47
4.1.2	Schnellläuferpresse	48
4.2	Versuchswerkzeuge	49
4.2.1	Prägewerkzeug.....	49
4.2.2	Lochwerkzeug.....	51
4.3	Werkstoffe	51
4.3.1	Naturharte Aluminiumlegierung AlMg3	51
4.3.2	Bronzelegierung CuSn6.....	53
4.3.3	Werkstoffcharakterisierung	54
4.4	Probekörper und Einlegegeometrie	57
4.5	Auswertemethoden	60
4.5.1	Auswertung der Makrogeometrie.....	60
4.5.2	Auswertung der Mikrogeometrie.....	61
4.5.3	Mikrohärtemessungen	64
4.6	Numerische Simulation	65

5	Auslegung des Folgeverbundprozesses	67
5.1	Scherschneidprozess	69
5.1.1	Analyse der Einflüsse auf die Schnittkantenqualität	69
5.1.2	Auslegung des Streifenbilds	75
5.2	Prägeprozess	77
5.2.1	Kantenprägen	78
5.2.2	Nutenprägen	81
5.3	Modulares Folgeverbundwerkzeug	89
5.4	Zusammenfassende Erkenntnisse	96
6	Grundlegende Analyse des umformtechnischen Kantenverrundens mittels Prägen.....	99
6.1	Umformzone beim Kantenprägen	100
6.2	Einflüsse von Maßtoleranzen auf das Kantenprägen	104
6.3	Einflüsse des Scherschneidens auf das Kantenprägen.....	108
6.4	Ansätze zur Reduktion der Prozesssensitivität.....	114
6.5	Zusammenfassende Erkenntnisse	117
7	Grundlegende Analyse der Oberflächenstrukturierung metallischer Einleger mittels Prägen	119
7.1	Prozess- und Stoffflussanalyse des Einprägens	119
7.1.1	Axialer Werkstofffluss	121
7.1.2	Lateraler Werkstofffluss	124
7.2	Analyse der Abbildungsgenauigkeit der Nutgeometrie	127
7.2.1	Resultierende Einlegergeometrie.....	136
7.2.2	Ausbildung der Kantengeometrie.....	138
7.2.3	Prozesskräfte.....	142
7.3	Zusammenfassende Bewertung	145
8	Erhöhung der Dichtheit von Kunststoff-Metall- Hybridbauteilen mittels umformtechnisch strukturierter Einleger	149
9	Zusammenfassung und Ausblick	153
10	Summary and future work.....	157
	Anhang	161
	Literaturverzeichnis	163

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Erläuterung</i>
μ	-	Reibzahl nach Coulomb
a	mm	Stempelbreite beim Flachstauchversuch
a_1	mm	Abstand Kavität (Kantenprägen)
b	mm	Probenbreite beim Flachstauchversuch
b_E	mm	Kanteneinzugsbreite
b_G	mm	Schnittgratbreite
b_K	mm	Breite Kavität (Kantenprägen)
b_R	mm	Rippenbreite
d	μm	Eindringdiagonale Vickershärte
d_k	μm	Korndurchmesser
h	mm	Probendicke beim Flachstauchversuch
h_B	mm	Bruchflächenhöhe
h_B/s_o	-	Bruchflächenanteil
h_E	mm	Kanteneinzugshöhe
h_E/s_o	-	relative Kanteneinzugshöhe
h_G	mm	Schnittgrathöhe
h_R	mm	Rippenhöhe
h_S	mm	Glattschnitthöhe
h_S/s_o	-	Glattschnittanteil
k_f	N/mm^2	Fließspannung
k_S	N/mm^2	Schneidwiderstand
k_w	N/mm^2	Umformwiderstand
l	mm	Abstand
l	mm	Probenlänge beim Flachstauchversuch
l_o	mm	Einlegerlänge initial
l_1	mm	Einlegerlänge nach der Umformung
l_S	mm	Länge der Schnittlinie(n)
Δl	mm	Längung Einleger (Nutprägen)
$\Delta l/l_o$	-	relative Längung Einleger (Nutprägen)
p	mm	Eindringtiefe (Nutprägen)
s_o	mm	Ausgangsblechdicke
s_1	mm	Restblechdicke nach dem Prägen (Nutprägen)
t	s; min; h	Zeit
t_K	mm	Tiefe Kavität (Kantenprägen)

u	mm	absoluter Schneidspalt
u/s_o	%	relativer oder bezogener Schneidspalt
$V_{\text{Kante -Z}}$	mm/s	Geschwindigkeit Stempelkante in -z-Richtung
$V_{\text{Werkstoff X}}$	mm/s	Geschwindigkeit Werkstoff in x-Richtung
w_o	mm	Stegbreite
Δw	mm	Breitung (Nutprägen)
$\Delta w/w_o$	%	relative Breitung (Nutprägen)
A_{50}	%	Bruchdehnung für Proben mit Messlänge 50 mm
A_S	mm ²	Scherfläche
BF	-	Breitungsfaktor
C_1, C_2	N/mm ²	werkstoffspezifische Modellparameter (Hockett-Sherby)
C_3, C_4	-	werkstoffspezifische, dimensionslose Modell- parameter (Hockett-Sherby)
F'_H	N	horizontale Reaktionskraft
F'_S	N	Reaktionskraft der Matrize
F'_V	N	vertikale Reaktionskraft
F_H	N	horizontale Kraft
F_{NH}	N	Niederhalterkraft
F_S	N	Schneidkraft
$F_{S \text{ max}}$	N	maximale Schneidkraft
F_V	N	vertikale Kraft
M	Nm	Moment
R_1	mm	Eckradius (Kantenprägen), Kantenradius (Nutprägen)
R_2	mm	Übergangsradius (Kantenprägen), Übergangs- radius (Nutprägen)
R_a	µm	arithmetischer Mittenrauwert
R_e	N/mm ²	Streckgrenze
R_e/R_m	-	Streckgrenzenverhältnis
$R_{p0,2}$	N/mm ²	0,2 %-Dehngrenze
α	°	Flankenwinkel Rippe
α_{+x}	°	Flankenwinkel Nut positiver x-Richtung
α_{-x}	°	Flankenwinkel Nut negativer x-Richtung
β	°	Knickwinkel (Nutprägen)
τ_S	N/mm ²	Scherfestigkeit
φ	-	Umformgrad

Abkürzung	Erläuterung
μ EDM	Mikroerodierfräsen (engl. <i>Micro Electrical Discharge Machining</i>)
Al	Aluminium
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
ECAP	Equal Channel Angular Pressing
Fe	Eisen
GF	Glasfaseranteil
kfz	kubisch flächenzentrierte Gitterstruktur
Mg	Magnesium
Mn	Mangan
Ni	Nickel
P	Phosphor
PA	Polyamid
Pb	Blei
PPS	Polyphenylensulfid
Si	Silizium
Sn	Zinn
Ti	Titan
TiN	Titannitrid
UT	unterer Totpunkt
WEDM	Drahterodieren (engl. <i>Wire Electrical Discharge Machining</i>)
WR	Walzrichtung
Zn	Zink

1 Einleitung

Die globale Entwicklung hin zu stärkerer Vernetzung bei Verbraucher-elektronik, Industrieanwendungen sowie im Automotivbereich führt zu einer steigenden Nachfrage an elektronischen Systemen. Im industriellen Umfeld wird der Bedarf an günstigen und leistungsstarken Sensoren und Aktoren durch das Zukunftsbild „Industrie 4.0“ noch verstärkt [1]. Ebenso die Entwicklung rund um das Automobil hinsichtlich Fahrerassistenzsysteme und des autonomen Fahrens erhöhen den Bedarf an Sensoren, Kommunikationssystemen sowie Rechen- und Steuereinheiten [2]. Aktuelle Prognosen gehen von einem jährlich wachsenden Bedarf an Automobil-Elektronik von 5,6 % aus [3]. Ein zentraler Trend elektronischer Baugruppen in Bezug auf die Automobilindustrie ist die Integration von Gehäuse, Substrat und Stecker im Hinblick auf eine verbesserte Funktionsdichte und einer bauraumorientierten, kompakten Bauform [4]. Vor diesem Hintergrund fällt der Herstellung von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen, bei denen ein elektrisch leitender, metallischer Einleger mit einer isolierenden Kunststoffkomponente umspritzt wird, eine besondere Bedeutung zu [5]. In diesem Rahmen tragen Kunststoff-Metall-Hybridbauteile auch zum Leichtbau im Fahrzeug bei, da ansonsten das Gewicht zusätzlicher Systeme aufwendig mitunter durch den Einsatz von Leichtbauwerkstoffen im Bereich der Karosserie kompensiert werden müssen [6]. Die so hergestellten Bauteile und Module sind oftmals Bestandteile komplexer und sicherheitsrelevanter Systeme, wie beispielsweise dem Antiblockiersystem oder der Motorensteuerung. Dementsprechend hoch sind die Anforderungen an Zuverlässigkeit und Ausfallsicherheit [7]. Durch den dezentralen und teils exponierten Einsatz dieser Systeme sind diese hohen Temperaturen, z. B. im Motorraum, Vibrationen sowie Feuchtigkeit und anderen Medien, wie Ölen, Salzen etc., ausgesetzt [8]. Aufgrund der chemischen Inkompatibilität von Kunststoffen und Metallen sowie durch thermomechanische Spannungen kann es zur Spalt- und Rissbildung zwischen Einleger und Kunststoff kommen [9]. Durch die Kapillarwirkung kann wiederum Feuchtigkeit eindringen, woraus Kriechströme, Delamination und Korrosion resultieren und zu einer Beeinträchtigung der Funktion oder sogar zum Ausfall führen können [8]. Daraus leitet sich der Bedarf an mediendichten Komponenten und Steckverbindungen für elektronische System ab.

Ein gängiges und großserientaugliches Verfahren zur Herstellung solcher Hybridbauteile ist das Umspritzen metallischer Einleger mit thermoplastischen Kunststoffen. Jedoch sind aufwendige Prozesse wie das Aufbringen

von speziellen Haftvermittlern oder ein mehrfaches Umspritzen mit unterschiedlichen Kunststoffen zur Sicherstellung der Dichtheit nötig [5]. Ein alternativer Ansatz, die Dichtheit zu verbessern, stellt die Strukturierung der metallischen Einleger mittels Quernuten dar [10]. Bei praktischen Untersuchungen zum Einfluss von Quernuten auf die Dichtheit [10] sowie bei grundlegenden Untersuchungen von Loch- und Kanalstrukturen zur Ausbildung der Dichtwirkung [11] wurde die Strukturierung mittels Laserbearbeitung vorgenommen. Dieses Vorgehen ist für einen produktiven Einsatz hinsichtlich Bearbeitungsdauer und Energiebedarf nicht zielführend. Darüber hinaus sind scharfe Kanten an metallischen Einlegern kritisch für Kunststoff-Metall-Hybridbauteile, da es zur Rissbildung infolge von Spannungskonzentrationen im Kunststoff kommen kann. Daher bietet der Ansatz, die Kanten umformtechnisch zu verrunden, hohes Potential, um die Bauteileigenschaften zu verbessern. Typischerweise werden metallische Einleger aufgrund der hohen Produktivität in Folgeverbundprozessen hergestellt, bei welchen die Einleger direkt mittels kombinierten Schneid- und Umformoperationen aus Bandmaterial gefertigt werden. Daher ist die umformtechnische Strukturierung und Kantenverrundung mittels Prägen zur Verbesserung der Dichtheit ein effizienter Ansatz.

Vor diesem Hintergrund ist die Intention mit dieser Arbeit ein grundlegendes Verständnis der Zusammenhänge hinsichtlich der Abbildung einer definierten Struktur und einer Kantengeometrie auf die resultierende Werkstückgeometrie zu schaffen. Im Kontext des Folgeverbundwerkzeugs werden die Einflüsse und Zusammenhänge sowohl unterschiedlicher Strukturen und Eindringtiefen als auch die Wechselwirkungen mit den vor- und nachgelagerten Operationen untersucht. Neben der experimentellen Umsetzung und Analyse wird mittels numerischer Simulation gezielt der Stofffluss während des Umformprozesses analysiert und dadurch Zusammenhänge des Prozesses und der Abbildungsgenauigkeit erarbeitet. Auf dieser Basis erfolgt eine ganzheitliche Bewertung der Prozesskette zur Herstellung metallischer Einleger vor dem Hintergrund der Qualifikation für die Weiterverarbeitung im Montagespritzguss. Dadurch soll ein umfassendes Prozessverständnis geschaffen werden, welches die Grundlage für die gezielte Auslegung umformtechnischer Strukturierungen für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile darstellt. Durch die angestrebte effiziente Produktion mediendichter Komponenten wird es daher zukünftig möglich sein, die Widerstandsfähigkeit elektronischer Systeme zu steigern, wodurch Elektroschrott reduziert und gleichzeitig die Sicherheit gegen Systemausfälle erhöht wird.

2 Stand der Technik und Forschung

In diesem Kapitel werden die wesentlichen Erkenntnisse aus akademischer und industrieller Forschung vorgestellt, verknüpft und bewertet. Zur thematischen Einordnung werden zunächst grundlegend Aspekte von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen, der Mediendichtheit sowie die Verbindung der metallverarbeitenden und kunststofftechnischen Fertigungsprozesse behandelt. Darauf aufbauend wird auf das Scherschneiden und das Prägen als wesentliche Fertigungsprozesse für die Herstellung metallische Einleger in einem Folgeverbundprozess eingegangen.

2.1 Kunststoff-Metall-Hybridbauteile und Dichtheit

Die Verbindung von Kunststoff und Metall findet sich an vielen Stellen im Alltag. Diese reichen im Kontext elektronischer Geräte, über Stecker von Strom- und Ladekabeln bis hin zu Strukturbauteilen im Auto. Gerade für Steckerverbinder werden die isolierenden Eigenschaften des Kunststoffs mit den leitenden Eigenschaften von Metall kombiniert. Für den Einsatz in trockener Umgebung ist hierbei vorrangig eine ausreichende mechanische Festigkeit der Verbindung für den korrekten Betrieb notwendig. Bei widrigen Einsatzbedingungen, insbesondere in Verbindung mit Feuchtigkeit, nimmt jedoch die Dichtheit als Bauteileigenschaft eine zentrale Rolle ein. In diesem Abschnitt wird daher zunächst auf die grundlegende Verbindung von Kunststoff und Metall im Montagespritzguss eingegangen und dann speziell der Aspekt der Dichtheit sowie die funktionalen Zusammenhänge adressiert.

2.1.1 Kunststoff-Metall-Hybridbauteile

Hybridbauteile sind im Sinne eines Werkstoffverbunds aus mindestens zwei Werkstoffen zusammengesetzt, welche unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Das Ziel ist es, die für den Anwendungsfall positiven Eigenschaften des jeweiligen Werkstoffes zu kombinieren und somit die Leistungsfähigkeit des einzelnen Werkstoffs zu erweitern oder unterschiedliche Funktionen integrieren [12]. Im Fall von Kunststoff und Metallen wird der Verbund durch das Metall verstärkt, der Kunststoff wiederum zeichnet sich durch Korrosionsbeständigkeit aus [13]. Bei elektrischen Kontakten wird die elektrische Leitfähigkeit von Metallen mit der isolierenden Eigenschaft von Kunststoffen kombiniert [14].

Das Montagespritzgießen als Sonderverfahren des Spritzgießens ist ein effizienter Prozess zur Herstellung von Hybridbauteilen [15]. Als allgemeine Definition kann das Montagespritzgießen als ein Prozess beschrieben werden, bei welchem unterschiedliche Teile eines Bauteils aus verschiedenen oder auch gleichen Werkstoffen durch Urformen zu einem Bauteil montiert werden [16]. Dies umfasst neben dem reinen Fügeprozess gemäß VDI 2860 die Gesamtheit aller Vorgänge für den Zusammenbau und schließt somit Nebenfunktionen wie das Handhaben, Prüfen und Justieren mit ein [17]. Die Verbunde können auf stoff-, form- oder auch kraftschlüssigen Fügemechanismen beruhen [16]. Durch den Wegfall zeit- und kostenintensiver nachgelagerter Montageprozesse können Einsparungen im Bereich 30 bis 70 % erreicht werden [15].

Eine Unterteilung des Montagespritzgießens hinsichtlich dem Umspritzen von Einlegeteilen kann in die Insert- und Outsert- und die Hybridtechnik erfolgen [12]. Bei der Outserttechnik werden funktionale Elemente an Bauelemente aus anderen Kunststoffen oder Metallen an- oder eingespritzt [13]. Das komplementäre Verfahren hierzu ist die Inserttechnik, wobei Einlegeteile umspritzt werden, welche die Funktionalität der Kunststoffkomponente erweitern [15]. Hierbei nimmt die Kunststoffkomponente den größeren Anteil des fertigen Bauteils ein. Bei der Outserttechnik werden typischerweise Distanzelemente, Schnapphaken, Biegefedern, Führungen oder Ähnliches an oftmals metallische Trägerbauteile angespritzt, um die Funktionalität zu erweitern [15]. Die Inserttechnik wird angewendet, um Gewindeeinsätze, metallische Einleger, Durchführungen oder Lagerwelle zu umspritzen und dies so in zusammenhängenden Kunststoffkomponenten einzusetzen [15].

Als Erweiterung hierzu ist der Bereich der Hybridtechnik für tragende und meist flächige Komponenten zu verstehen. Diese zeichnet sich durch die synergetische Verwendung von Werkstoffen mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften aus [12]. Hierbei wird die mechanische Belastbarkeit von offenen Blechkomponenten wie U-Profilen durch das Anspritzen von Verstärkungen, z. B. durch Rippen, wesentlich erhöht. Dadurch können leichte und gleichzeitig steife Bauteile realisiert werden, da die Kunststoffstrukturen das Beulen oder Ausknicken der Blechkomponente verhindern und somit das mechanische Potential des Blechs in wesentlich höherem Maß ausgenutzt werden kann [15]. Solche Strukturbauteile finden sich im Automobil z. B. als Frontendträger, Instrumententafeln oder Cockpitquerträger. Bei solchen Komponenten ist die Verbindungsfestigkeit zwischen Kunststoff und Metall die primäre Zielgröße. Grundlegende wissenschaft-

liche Untersuchungen hierzu wurden im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 396 durchgeführt [18]. Aufgrund der chemischen Inkompatibilität von Kunststoffen und Metallen werden in der Regel form- und kraftschlüssige Verbindungselemente wie Durchbrüche, Aussparungen oder räumlich gestalteten Elementen vorgesehen [12]. Dies ist jedoch mit der lokalen Einleitung von Kräften und Belastung verbunden. Ansätze für eine flächige Verbindung ist der Einsatz von Haftvermittler, wodurch es möglich ist, eine stoffschlüssige Verbindung für Kunststoff-Metall-Hybride herzustellen. In diesem Zusammenhang wurde für thermisch aktivierte Haftvermittlersysteme für Fahrzeugkomponenten eine Leistungssteigerung bzgl. der Steifigkeit um mehr als 20 % erreicht [19]. Darüber hinaus gibt es Ansätze für die Verbesserung der Bindung von Kunststoff und Metall mittels strukturierter Metalloberflächen. In Untersuchungen mit gefrästen Strukturen in Form von Nuten und Bohrungen in der Größenordnung von 0,3 – 1,5 mm wurde eine Leistungssteigerung der Scherfestigkeit durch den Formschluss nachgewiesen [20]. Ein weiterer Ansatz basiert auf dem aus der Klebetechnik bekannten Konzept der mechanischen Adhäsion, welcher auf dem Vorhandensein einer rauen Kontaktfläche beruht, in der sich der Kunststoff wie in Bild 1 a) in kleinen Poren und oder Hinterschnitten verhaken kann und somit einen Mikroformschluss ausbildet [21].

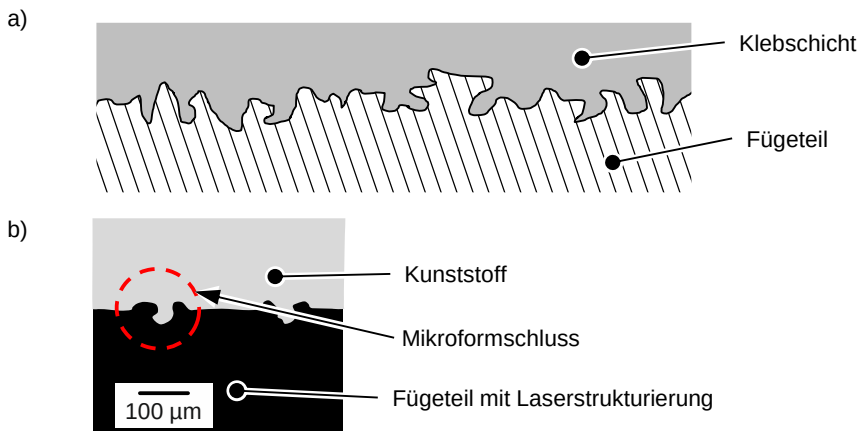


Bild 1: a) Schematische Oberflächenstruktur in der Klebetechnik [21] und b) Mikroformschluss bei laserstrukturierter Probe [22]

Ein Ansatz für die gezielte Herstellung von entsprechend strukturierten Oberflächen ist die Bearbeitung mittels Laserablation. Bei der Hochgeschwindigkeits-Lasermikrostrukturierung führt die Kombination aus Verdampfen und lokalem Aufschmelzen des Materials zur Ausbildung von

kleinen Kavitäten, wobei es durch das Rückfließen von aufgeschmolzenem Material im Randbereich zur Bildung von Hinterschnitten wie in Bild 1 b) kommt [22]. Die Zielgröße dieser Untersuchungen ist jedoch die Verbundfestigkeit und nicht die Dichtheit des Verbunds.

2.1.2 Dichtheit bei Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen

Durch den zunehmenden Einsatz elektronischer Systeme in allen Lebensbereichen und bedingt durch deren dezentrale und exponierte Einsatzorte nimmt die Bedeutung der Mediendichtheit bei der alltäglichen Nutzung zu. Aus diesem Grund besteht der Bedarf der Erarbeitung grundlegender Erkenntnisse, um auf deren Basis effiziente Ansätze und Methoden zur Verbesserung der Mediendichtheit von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen ableiten zu können.

Im allgemeinen alltäglichen Umgang wird von Dichtheit in der Regel im Zusammenhang mit Wasserdichtheit gesprochen. Eine genaue Spezifikation wird oftmals nicht gegeben oder es ergibt sich diese implizit aus dem Kontext des Anwendungsfalls. Neben der Dichtheit gegenüber flüssiger Medien gibt es auch Anwendungsfälle, bei denen Gasdichtheit gefordert ist wie in der Vakuumtechnik. Eine wichtige Erkenntnis im Zusammenhang mit Dichtheit ist, dass keine „absolute Dichtheit“ existiert [23]. Letztendlich kommt es immer zu einer Leckage, wenngleich auf atomarer Ebene. Daraus ergibt sich die technische Beschreibung der Dichtheit nach der Norm DIN EN ISO 20484 als Leckagerate, welche kleiner oder gleich der spezifizierten Leckagerate ist [24].

Die Leckage setzt sich aus einem Diffusionsanteil durch den Dichtwerkstoff und einen Strömungsanteil über die Grenzfläche zwischen Dichtung und Gegenfläche zusammen [25]. Nachfolgend wird nur der Strömungsanteil behandelt, da der Diffusionsanteil im Verhältnis wesentlich geringer ist und bezogen auf die Anwendungsfälle von Kunststoff-Metall-Hybridbauteile im Automobil eine untergeordnete Rolle einnimmt. Leckage an der Grenzfläche zweier Dichtpartner entsteht durch Spalten oder Kanäle an den Kontaktflächen. Die Leckagerate wiederum hängt von der Viskosität des Fluids und der vorherrschenden Druckdifferenz ab. Ohne äußeren Druck kann der Kapillareffekt die Leckage und somit die Undichtheit begünstigen. Die Beschreibung der Vorgänge an der Kontaktfläche und die damit verbundene Kontaktmechanik für theoretische Bestimmung von Leckageraten stellt eine Herausforderung dar. In dem Zusammenhang ist der Einfluss der Beschaffenheit technischer Oberfläche stark durch die Rauheit

und die Oberflächenstruktur beeinflusst. Ansätze zur theoretischen Beschreibung der Vorgänge an der Kontaktfläche bei Dichtungen und der daraus resultierenden Leckageraten basieren auf der Perkolationstheorie [26].

Die zugrundeliegende Überlegung ist, dass eine technische Oberfläche zwar glatt erscheinen mag, aber mit zunehmender Vergrößerung Rauheitsspitzen und -täler offenbar werden. Das bedeutet, dass bei einem zunächst vollständig erscheinendem Kontakt zwischen den beiden Dichtpartnern wie in Bild 2 a) bei zunehmender Vergrößerung Bereiche ohne Kontakt, z. B. Rauheitstäler, erkennbar werden. Die Bereiche ohne Kontakt in Bild 2 b) und c) stellen Kanäle dar, über welche ein Fluid vordringen kann. Ab einer bestimmten Vergrößerungsstufe kommt es entsprechend der Perkolationstheorie zur Bildung von Leckagenetzwerken wie in Bild 2 d), welche den vollständigen Dichtbereich überbrücken und somit zur Leckage führen. [26]

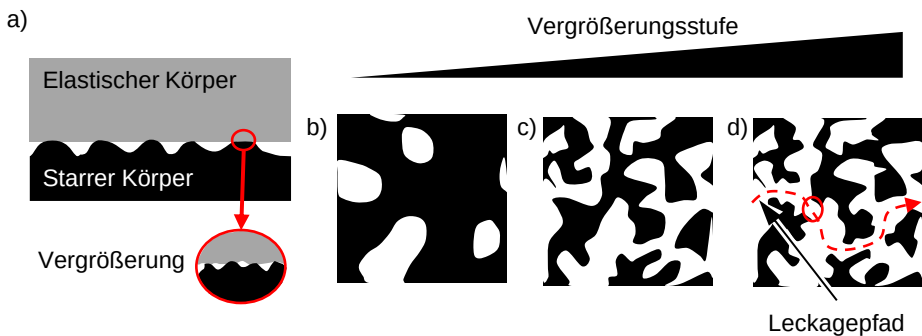


Bild 2: Schematische Darstellung der Kontaktfläche in Abhängigkeit unterschiedlicher Vergrößerungen und Ausbildung von Leckagepfaden, nach [27]

Die Anzahl und Querschnittsfläche der Leckagepfade bestimmen wiederum die Leckagerate. Mit der Annahme einer angepressten, elastischen Dichtung wird die Querschnittsfläche der Leckagepfade mit höherem Anpressdruck reduziert und somit verringert sich die Leckagerate. Anhand experimenteller Untersuchungen mit elastischen Gummidichtungen und einem festen Dichtpartner konnte eine gute Übereinstimmung von Experiment und theoretischem Ansatz nachgewiesen werden [27].

Aus technischer Perspektive können die Wirkprinzipien passiver Dichtungen in statische und hydrodynamische Mechanismen unterteilt werden [25]. Als statisch ist der hermetische Festkörperkontakt der beiden Dichtpartner einzustufen, welcher wesentlich von der Oberflächenbeschaffenheit und dem Anpressdruck im Kontaktbereich beeinflusst ist. Bei

dynamischen Dichtungen, bei welchen eine Relativbewegung zwischen den Dichtpartnern auftritt, ist der hermetische Festkörperkontakt aufgrund der hohen Reibung und der draus resultierenden Erwärmung und dem Verschleiß nicht praktikabel. Daher haben diese einen Dichtspalt während der Bewegung, weshalb hier keine vollständige Dichtheit erreicht wird. Es wird im Zusammenhang mit den hydrodynamischen Aspekten von einer Drosselwirkung gesprochen. Das bedeutet, dass die Leckagerate durch enge Spalte, scharfe Umlenkungen und eine Verlängerung des Dichtweges reduziert wird. Diese Ansätze finden in Labyrinthdichtungen Anwendung. [25]

Mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile

Die Kombination von Kunststoff und Metall findet sich in vielen Anwendungen. Dabei ist das Umspritzen metallischer Einleger mit thermoplastischem Kunststoff ein sehr effizientes Verfahren, um solche Bauteile herzustellen. Neben diversen Vorteilen gibt es einige kritische Aspekte, welche im Zusammenhang mit Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen zu beachten sind. Gerade im Hinblick auf das Einsatzverhalten sind nach [28] folgende, ausgewählte Punkte zu nennen:

- Es können Spannungskonzentrationen im Kunststoff auftreten, insbesondere an scharfen Kanten.
- Unterschiedliche Abkühlgeschwindigkeiten von Einleger und Kunststoffschmelze können zu hohen Spannungen nach dem Abkühlen führen.
- Für eine kontinuierliche Fertigung bei konstanten Zykluszeiten besteht der Bedarf eines automatisierten Handling-Systems für die Einleger.
- Infolge unzureichender Abdichtung durch zu großer Toleranzschwankungen des Einlegers besteht die Gefahr von Gratbildung beim Umspritzen.
- Es kann eine Schädigung des Spritzgießwerkzeugs durch inkorrekt eingelegte oder verschoben Einleger auftreten.
- Eine Vorwärmung der Einleger führt in der Regel zur Verbesserung der Fließigenschaften und der Formfüllung der Schmelze.
- Hinsichtlich der Alterungseffekte ist zu beachten, dass die Relaxation des Kunststoffs zur Rissbildung führen kann oder das Kriechen eine Reduktion des Fugendrucks zwischen Kunststoff und Metall bewirkt.
- Mediendichtheit kann in der Regel nur durch spezielle zusätzliche Maßnahmen erreicht werden.

Gerade bei elektronischen Komponenten und Steckverbindern ist Mediendichtheit eine wichtige Anforderung. Da eindringende Feuchtigkeit zu eingeschränkter Funktionsfähigkeit bis hin zum vollständigen Ausfall elektronischer Systeme führen kann. Grundsätzlich sind stoffschlüssige Verbindungen für mediendichte Bauteile geeignet, allerdings ist die chemische Inkompatibilität von Kunststoff und Metall in diesem Zusammenhang eine zentrale Herausforderung [29].

Wesentliche Versagensbilder an Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen, welche zu Undichtheit führen, sind, wie in Bild 3 dargestellt, einerseits die Spaltbildung zwischen Einleger und Kunststoff und andererseits die Rissbildung im Kunststoff [9]. Schwindung, Verzug und Haftung sind wesentliche Einflussfaktoren bezüglich der resultierenden Dichtheit beim Montagespritzgießen [9].

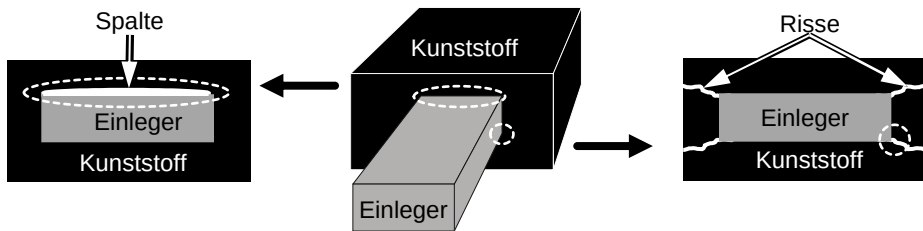


Bild 3: Schematische Darstellung von Spalt- und Rissbildung

Aufgrund des unterschiedlichen Schwindungsverhaltens von Kunststoff und Metall ergibt sich entweder ein Aufschwinden des Kunststoffs, was zu lokalen Spannungsspitzen insbesondere an scharfen Kanten und somit zu Rissbildung führen kann, oder ein Abschwinden was direkt zur Spaltbildung führt. Daher wurde die Haftungsoptimierung als Lösungsansatz für die Problematik der Undichtheit abgeleitet [9]. Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 694 wurden Untersuchungen der grundlegenden Mechanismen angestellt und auf Basis rein numerischer Untersuchungen Ansätze für Dichtungskonzepte entwickelt, welche auf konstruktiven Maßnahmen und geometrischen Merkmale am Einleger in Form Nuten basieren [30]. In diesem Zusammenhang wurde abgeleitet, dass die dreidimensionale Geometrie und die Struktur des Einlegers einen maßgeblichen Einfluss auf die Dichtheitseigenschaften des fertigen Bauteils haben. In [9] wurden anhand numerischer Untersuchungen vorgestellt, dass ein gezieltes Aufschwinden durch eine geeignete Anordnung von Nuten oder Rippen am Einleger einen positiven Effekt auf die Bildung von Spalten somit die Dichtheit haben kann. Darüber hinaus wurde der Effekt einer verbesserten

Haftung von Kunststoff und Metall auf die Spannungsverteilung untersucht, was tendenziell eine homogenere Spannungsverteilung begünstigt. Durch experimentelle Untersuchungen an Einlegern aus Edelstahl 1.4016 und den Kunststoffen Polyamid 6 und Polyamid 66 konnte der positive Einfluss einer Polyamidbeschichtung der Einleger vor dem Umspritzen auf die Dichtheit nachgewiesen werden [9]. Dies bestätigt die Ergebnisse von [31], anhand derer eine deutliche Verbesserung der Dichtheit durch die Applikation unterschiedlicher Beschichtungssysteme auf metallischen Steckkontakten nachgewiesen wurde. In diesem Zusammenhang wurde auch der Einfluss der Bauteilstressung durch Klimawechseltests auf die Dichtheit herausgestellt. Dies wirkt sich vor allem auf die Dichtheit bei unbehandelten Einlegern aus [31].

Im Rahmen der Studie „Mediendichtes Umspritzen von Einlegeteilen aus Metall und Keramik“ wurden in rein experimentellen Versuchsreihen eine Vielzahl an Einflussfaktoren auf die resultierende Dichtheit der Verbunde untersucht [10]. Neben verschiedenen Kunststoffen und Vorwärmtemperaturen der Einleger wurde auch im größeren Umfang der Einfluss unterschiedlicher Oberflächenstrukturierungen metallischer Einlegeteile auf die Dichtheit analysiert. Die Erkenntnisse basieren vorrangig auf der Bewertung der Dichtheit auf Basis der Leckagerate von Differenzdruckprüfungen. Die Untersuchungen wurden mit metallischen Einlegern aus Kupfer E-CU58 F26 mit einer Blechdicke von 0,8 mm und 2,0 mm in Kombination mit einem Polyamid 6 GF 50 mit 50 % Glasfaseranteil und einem ungefüllten Polyamid 66 durchgeführt. Nachfolgend soll nur auf die Untersuchungen zum Einfluss der Oberflächenstruktur eingegangen werden. Zum Aufrauen der Oberfläche wurden Bürsten, Schleifpapier und Polierwolle verwendet, womit eine stochastische Oberflächenstruktur erzeugt wurde. Mit Schleifbürsten wurde zusätzlich der Einfluss der gerichteten Orientierung in Bezug auf den Einleger analysiert.

Es wurde festgestellt, dass ein Aufrauen die Verbundfestigkeit in Form höherer Auszugskräfte verbessert. Dies gilt unabhängig von der Orientierung beim Schleifen. Gleichzeitig war die Dichtheit aufgerauter Proben gleich oder schlechter als bei unbehandelten Proben. Für Einleger mit gerichteter Aufrauung wurde eine reduzierte Dichtheit für alle untersuchte Orientierung festgestellt. Insbesondere bei Längsorientierung tritt eine deutlich höhere Leckagerate auf, wohingegen bei Querorientierung die Leckagerate nur geringfügig höher als bei unbehandelten Proben ist. Dies deutet auf die Ausbildung ungünstiger Leckagenetzwerke durch das Aufrauen hin.

Neben stochastischen Oberflächenstrukturen wurden auch geometrisch bestimmte Strukturen in Form von Quernuten auf die Einleger aufgebracht. Im Rahmen der Studie wurden Nuten mittels Graviernadel, Fräser und Laserablation gefertigt. Die Abmessungen lagen bei 1 mm Breite und 0,3 mm Tiefe für gefräste Nuten und bei 0,2 mm Breite und 0,05 mm Tiefe für laserstrukturierte Nuten. Ohne definierte Angaben wurden mittels Graviernadel feine, schmale Nuten eingeritzt. Während die gefrästen und geritzten Nuten geradlinig waren, hatten die laserstrukturierte Quernuten einen sägezahnförmigen Nutverlauf.

Anhand der Leckagerate kann festgestellt werden, dass sich definierte Quernuten grundsätzlich positiv auswirken im Vergleich zur unbehandelten Referenz. Tendenziell ist der Effekt für die 1 mm breiten gefrästen Nuten stärker als für die feinen, geritzten Nuten. Darüber hinaus verbessert die Anordnung mehrerer Nuten hintereinander die Dichtheit. Die geringste Leckage und somit höchste Dichtheit wurde für laserstrukturierte Quernuten erreicht. Hierbei wurden 12 Nuten im Abstand von 0,8 mm hintereinander angeordnet in Kombination mit einem sägezahnförmigen Nutverlauf. Aus den Untersuchungen kann jedoch nicht geschlossen werden, ob die hohe Anzahl an Nuten, die Nutabmessung oder der sägezahnförmige Verlauf ausschlaggebend für das Ergebnis ist.

Von Byskov-Nielson et al. [32] wird gezielt der Einfluss unterschiedlicher Laserstrukturierungen auf die Dichtheit Kunststoff-Metall-Verbunde aus Edelstahl 1.4301 und Polyphenylensulfid PPS untersucht. Hierbei wurde die Innenseite eines Edelstahlrings strukturiert und anschließend ein zylindrischer Napf angespritzt. Im Gegensatz zu den zuvor aufgeführten Untersuchungen [10] ist kein Einleger umspritzt worden, auf den der Kunststoff aufschwinden kann. Es wurde der Einfluss von Lochrastern mit einem Durchmesser von ca. 100 μm , umlaufenden Nuten mit einer Breite von ca. 100 μm und einer Kombination aus Löchern und Nuten untersucht. Die Dichtheit wurde mittels Wägen bestimmt, indem 10 ml Wasser in das Bauteil eingebracht, dieses dann versiegelt und anschließend bis zu 150 °C erwärmt wurde, um die Leckage für unterschiedliche Drücke zu prüfen. Die Bewertung erfolgte anhand der Massendifferenz. Es trat eine höhere Leckage bei höherem Druck auf, jedoch konnte kein Unterschied zwischen den Strukturierungen festgestellt werden. Ein Vergleichswert für eine unstrukturierte Probe fehlt, daher ist eine Einordnung und Bewertung der Wirkung der Laserstrukturierung nicht möglich.

Aufbauend darauf befasst sich Bonpain [11] mit dem Thema der Verbesserung von Kunststoff-Metall-Verbunden sowohl hinsichtlich der Festigkeit

als auch der Dichtheit. Hierbei wurde die Modifikation metallischer, rohrförmiger Einleger einerseits unter dem Aspekt der Mikroverklammerung durch Strahlen oder Laserstrukturieren der Oberfläche und andererseits unter dem Aspekt der Makroverklammerung durch Umformung der Einleger untersucht. Die Arbeiten wurden mit elliptischen Rohren aus Aluminium EN AW 3103 mit einer Wandstärke von 0,25 mm in Kombination mit dem Kunststoff Polyamid PA 66 GF 30 durchgeführt. Das Strahlen erfolgte mittels Edelmetall. Die geometrisch bestimmte Strukturierung wurde mittels Laserablation hergestellt. Es wurde dabei der Effekt von Lochrastern und Nuten in Anlehnung an [32] und [10] untersucht. Aufgrund der Größenordnung von 5 - 200 µm Durchmesser und 5 - 100 µm Tiefe sowie Abständen im Bereich 7,5 - 600 µm werden die Effekte zusammen mit den gestrahlten Oberflächen von Bonpain unter dem Begriff Mikroverklammerung zusammengefasst. Der Kategorie Makroverklammerung ordnet er die formschlüssige Verbindung zwischen Einleger und Kunststoff zu. Hierbei wurden Aluminiumröhrchen angestaucht, so dass entweder durch Ausknicken ein umlaufender Wulst entsteht oder es nach dem Ausknicken zu einem Umstülpen kommt, wodurch sich ein Hinterschnitt bildet. Für gestrahlte Proben wurde eine Steigerung der Dichtheit festgestellt, allerdings nur bei Verwendung von feinem Strahlgut und folglich einer geringen Oberflächenrauheit. Die besten Ergebnisse wurden für $R_a = 3 \mu\text{m}$ erzielt. Bei hohen Rauheitswerten wiederum verschlechtert sich die Dichtwirkung im Vergleich zur unbehandelten Referenz. Es wurde für die laserstrukturierten Proben festgestellt, dass sowohl bei Löchern als auch Nuten die Dichtheit gesteigert werden kann. Darüber hinaus hat der Abstand der Strukturen einen merklichen Einfluss. Ist der Abstand zwischen den Strukturen kleiner als das 1,5-fache des Durchmessers, so kommt es zu Überlappungen und infolgedessen zur Bildung von Leckagepfaden. Dies ist für Nuten stärker ausgeprägt, da von einer zusätzlichen Unterstützung der Kapillarwirkung ausgegangen wird. Ist der Abstand zu groß, nimmt die positive Dichtwirkung der Strukturierung ebenfalls ab. Aspektverhältnisse der Strukturen sollten kleiner 1 sein, da sonst keine ausreichende Füllung der Struktur erreicht wird und sich somit Spalten bilden. Für die Makroumklammerung der umgeformten Einleger wurde festgestellt, dass für formschlüssige Verbindungen mit umlaufendem Wulst eine unzureichende Anbindung erreicht wird, weshalb es zu einem radialen Abschwinden des Kunststoffs kommt und infolgedessen Spaltbildung auftritt. Im Gegensatz hierzu wird bei Einlegern mit umgestülptem Bereich ein Hinterschnitt erzeugt, wodurch das radiale Abschwinden behindert wird und der Kunststoff gegen den hinterschnittigen Bereich gepresst wird, was die Spaltbildung verhindert und somit zu einer Verbesserung der Dichtheit führt. Es

ist davon auszugehen, dass die aufgeführten Maßnahmen in [11] aufgrund der mechanischen Adhäsion in Form von Mikroverklammerungen sowie der Makroverklammerung an Hinterschnitten die Forderung von [9] nach einer erhöhten Haftung für mediendichte Materialverbunde erfüllen, indem ein Abschwinden verhindert oder reduziert wird.

Die Untersuchung der Zusammenhänge für die Herstellung mediendichter Kunststoff-Metall-Hybridbauteile unter Einbeziehung der vollständigen Prozesskette von der Einlegerherstellung bis zum Montagespritzguss war Gegenstand des durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekts „Grundlagenuntersuchung zum Trennen, Umformen und Montagespritzguss und deren Interdependenz für die Herstellung beständig mediendichter elektronischer Systeme“. Ziel des Vorhabens war es, die Potentiale, Grenzen und Wechselwirkungen der Prozessschritte Trennen, Umformen und Montagespritzgießen im Hinblick auf eine möglichst kurze, robuste Prozesskette zu untersuchen. Das Projekt wurde durch den Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT) zusammen mit dem Lehrstuhl für Kunststofftechnik (LKT) der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg bearbeitet. Die vorliegende Arbeit sowie die hier folgenden Erkenntnisse wurden im Rahmen des Projekts erarbeitet.

Die in diesem Zusammenhang durchgeführten Untersuchungen von Kleffel et al. [33] an geätzten Proben bestätigen, dass den positiven Effekt der mechanischen Adhäsion in Form von Mikroverklammerungen. Durch das elektrochemische Strukturieren mit 5-prozentiger Salzsäure von Einlegern aus AlMg₃ (EN AW 5754), wodurch mitunter die Korngrenzen angegriffen werden, entstehen hinterschnittige Oberflächenstrukturen mit einer Strukturtiefe von etwa 26 µm. Diese Strukturen werden beim Umspritzen gefüllt und durch die Mikroverklammerung des Kunststoffs in den Hinterschnitten wird ein Abschwinden unterbunden, wodurch eine merkliche Verbesserung der Dichtheit gegenüber unbehandelter Referenzproben nachgewiesen werden konnte. Darüber hinaus werden durch das Ätzen Grate entfernt und es kommt zur Verrundung scharfer Kanten. Durch die Reduzierung von Spannungskonzentrationen und somit der Vermeidung von Rissen im Kunststoff wird somit ein positiver Beitrag zu den Dichtheitseigenschaften erreicht.

Gerade die Kantenverrundung in Zusammenhang mit klimatischer Bauteilstressung hat einen Effekt auf die Beständigkeit der Mediendichtheit. Dies wurde von Heinle et al. [34] für Einlegern aus AlMg₃ (EN AW 5754) mit verrundeten Kanten mit Radien von 250 µm und 350 µm, welche mit Polyamid Polyamid 66 mit 30 Gewichtsprozent Kurzglasfaserverstärkung

(PA 66 GF 30) umspritzt wurden. Die Kanten der Einleger wurden umformtechnisch verrundet. Der Umformprozess ist mitunter Bestandteil dieser Arbeit. Anhand numerischer Untersuchungen zur Spannungsverteilung an den beschriebenen Kunststoff-Metall-Hybriden wurde aufgezeigt, dass die schwindungsinduzierten Spannungen im Kunststoff durch verrundete Kanten gleichmäßig verteilt und risskritischen Spannungskonzentrationen reduziert werden [35]. Der Effekt auf die beständige Dichtheit wurde experimentell untersucht. Mittels einer zyklischen Temperatur-Schock-Prüfung, welche einen klimatischen Wechsel zwischen $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ vorsieht, wurde der Einfluss auf die Dichtheit analysiert. Die Bewertung erfolgte anhand des Druckabfalls während der Differenzdruckprüfung. Nach 160 Zyklen wurden alle unbehandelten Proben mit scharfen Kanten als undicht bewertet, wohingegen für Proben mit Kantenverrundung noch keine Ausfälle festgestellt werden konnten. Anhand von Schliffbildern konnte eine Rissbildung an den scharfen Kanten nachgewiesen werden, was einen ursächlichen Zusammenhang hinsichtlich der Dichtheit stützt. Bei den verrundeten Proben wurden ebenfalls Risse festgestellt, diese sind jedoch in Größe und Anzahl geringer und im Vergleich noch nicht versagenskritisch, was durch die quantitativen Ergebnisse der Dichtheitsprüfung bestätigt wird.

Neben der Rissbildung ist die Spaltbildung ein wesentlicher Faktor, welcher zur Undichtheit von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen beiträgt. Daher wurde von Kleffel et al. [36] gezielt die Entstehung und die Ursachen für die Spaltbildung analysiert. Dies wurde an metallischen Einlegern durchgeführt, welche umformtechnisch mit Quernuten strukturiert wurden, was dem Konzept einer Labyrinthdichtung entspricht. Dem wurde der Ansatz einer elektrochemisch geätzten, flächigen Dichtung gegenübergestellt. Die Darstellung in Bild 4 zeigt die unterschiedlichen Varianten. Es wurde bei einer Blechdicke von 1 mm die Nuttiefe zwischen 100 μm und 300 μm variiert bei einer konstanten Nutbreite von 500 μm .

Die geprägten Einleger in Bild 4 a), welche typischerweise lokale Ausbauchungen aufweisen, wurden mit der konturierten Varianten in Bild 4 b) verglichen, bei welcher die Ausbauchung geometrische durch Aussparungen kompensiert wird und sich eine Geometrie ähnlich einer umlaufenden Nut ergibt. Bei den verwendeten Werkstoffen handelt es sich um AlMg3 (EN AW 5754) in Kombination mit Polyamid PA 66 GF 30.

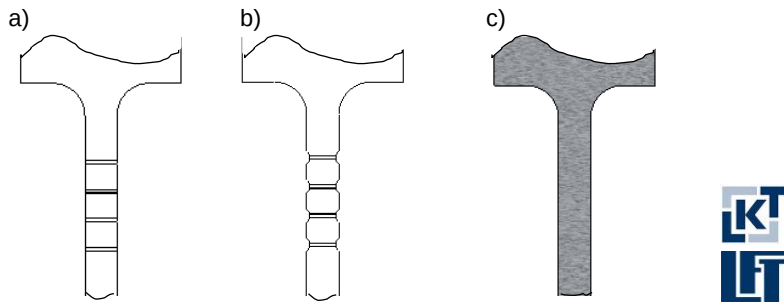


Bild 4: Untersuchte metallische Einleger mit a) geprägten Quernuten, b) mit Konturierung und c) geätzten Strukturen nach [36] aus gemeinsamer Arbeit des LFT und LKT

Anhand von einer Differenzdruckprüfung und dem Blasenprüfverfahren wurde nachgewiesen, dass für alle strukturierten Varianten die Leckagerate reduziert werden kann und somit die Dichtheit verbessert wird. Proben mit Quernuten (Bild 4 a) und großer Prägetiefe führen im Vergleich zu höheren Leckageraten, was auf die stärkere Materialausbauchung infolge des größeren verdrängten Volumens zurückgeführt wird. Die anderen geprägten Probenvarianten weisen eine vergleichbare Leckagerate auf. Da für Probenvarianten mit Konturierung unabhängig von der Prägetiefe die gleiche Leckagerate gemessen wurde, wird daraus geschlossen, dass die Prägetiefe selbst keinen relevanten Effekt auf die Dichtheit hat. Was die Erkenntnis des tendenziell nachteiligen Einflusses lokaler Ausbauchungen auf die Dichtheit bekräftigt. Durch die Messungen von Spalten in Schliffbildern wurde speziell die Spaltbildung untersucht und ein komplexer Zusammenhang bei geprägten Einlegern mit dem Schwindungsverhalten des Kunststoffes dargelegt. Hierbei wirkt die Volumenschwindung des teilkristallinen Polyamids dem thermischen Aufschwinden des Kunststoffes teilweise entgegen und die Spaltbildung wird begünstigt. Daraus lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten [36]:

- Bei der Platzierung von Strukturen, die als Barriere einer Labyrinthdichtung dienen, muss das Schwindungsverhalten des Kunststoffes und mögliche Schwindungsbehinderungen berücksichtigt werden.
- Die Strukturen einer Labyrinthdichtung müssen tiefer sein als die schwindungsbedingte Spaltbreite, um diese zu kompensieren.
- Eine umlaufende Barriere in Form einer Nut um den Einleger sollte für Labyrinthdichtungen angestrebt werden.
- Mittels geätzter, flächiger Strukturierung kann ein Abschwinden und somit die Spaltbildung durch die Verklammerung des Kunststoffes in Mikrohinterschnitten unterbunden werden.

Diese Erkenntnisse zeigen, dass es starke Wechselwirkungen zwischen der Gestaltung des Einlegers, dessen Herstellungsverfahren sowie dem Umspritzprozess gibt. Daher sind eine ganzheitliche Berücksichtigung der Prozesskette und die genaue Kenntnis der einzelnen Prozesse notwendig, um eine gezielte Auslegung von mediendichten Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen zu ermöglichen.

2.2 Folgeverbundprozesse

Die typische Prozesskette für die Herstellung von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen setzt sich aus einem Folgeverbundprozess für die Produktion metallischer Einleger und dem anschließenden Montagespritzguss zusammen. Bei dem Folgeverbundprozess handelt sich um ein hochproduktives Verfahren, mit welchen große Mengen präziser Werkstücke bei gleichzeitig hoher Werkstoffeffizienz hergestellt werden können [37]. Hierbei werden im Wesentlichen Trennprozesse mittels Scherschneiden und Umformoperationen sequenziell in einem Werkzeug umgesetzt. Zum Umformen können das Biegen, Ziehen und Prägen gezählt werden. Darüber hinaus können Fügeoperationen miteinbezogen werden. Der Folgeverbundprozess ist dadurch charakterisiert, dass die Operationen am zusammenhängenden Streifen erfolgen [38]. In der industriellen Praxis hat sich der Begriff „Stanzen“ erhalten, dabei handelt es sich jedoch um keine genormte Bezeichnung mit klarer Definition [37], daher wird von der Verwendung in der Wissenschaft abgesehen. In einem Folgeverbundwerkzeug sind die einzelnen Operationen in fester Folge angeordnet und das Werkstück entsteht, indem der Streifen sukzessiv zwischen jedem Hub weitergeschoben wird. Sind nur aufeinander folgende Schneidoperationen Bestandteil des Werkzeugs, spricht man auch von einem Folgeschneidwerkzeug. Die Werkzeuge sind in der Regel zweiteilig als Ober- und Unterwerkzeug ausgeführt und werden meist auf mechanischen Schnellläuferpressen mit O-Gestellbauweise eingesetzt. Dadurch wird einerseits eine hohe Steifigkeit und Führungsgenauigkeit erreicht und andererseits können dadurch insbesondere in der Hochleistungsstanztechnik Hubfrequenzen üblicherweise bis zu 2000 Hub/min realisiert werden [37]. Mittlerweile erreichen spezielle Hochgeschwindigkeitspressen sogar bis zu 4000 Hub/min [39]. Für die Herstellung von Bauteilen in großer Stückzahl wird Bandmaterial direkt vom Coil verarbeitet. Hierbei kann zwischen Haspel und Schnellläuferpresse ein Richtautomat geschaltet werden, durch den das gekrümmte Band gerichtet wird. Beim Abwickeln und Richten wird ein möglichst kon-

tinuierlicher Prozess angestrebt, um ein ständiges Beschleunigen und Verzögern großer Massen zu vermeiden. Über eine Blechschleife werden der kontinuierliche Prozess und der diskontinuierliche Vorschub in der Presse gepuffert. Gleichzeitig muss nur die Schleife und das im Werkzeug befindliche Band durch den Bandvorschub beschleunigt werden, wodurch eine hohe Dynamik insbesondere bei hohen Hubfrequenzen sichergestellt wird.

Die Reihenfolge und Form der einzelnen Schneid- und Umformstufen sind im sogenannten Streifenbild festgelegt, welches die Teilschritte aller Stufen umfasst. Hierbei werden auch Hilfsgeometrien wie Sucherlöcher, welche zum präzisen Positionieren des Streifens dienen, festgelegt. Aus dem Streifenbild werden dann die einzelnen Umform- und Schneidstufen entwickelt. Üblicherweise beginnt das Streifenbild mit einer Schneidoperation, in der meist die Sucherlöcher erzeugt werden. Die letzte Stufe umfasst stets eine Trennstufe, in der das Werkstück vom Streifen getrennt wird [38]. In Abhängigkeit der Anforderungen des Werkstücks ist die Orientierung des Schnittgrats, die sogenannte Gratlage, festzulegen [40]. Davon leitet sich unter anderem ab, auf welche Weise das Werkstück vom Streifen getrennt wird. Dies kann durch Ausschneiden erfolgen, wodurch der Grat an der Blechoberseite liegt, was der Gratseite von geschnittenen Innenkonturen oder Löchern entgegengesetzt ist. Eine gleichgerichtete Orientierung des Grats kann aber mittels eines Trennstegs erreicht werden, was jedoch den Verschnittanteil erhöht. Beim Abschneiden wird zusätzlicher Verschnitt vermieden, jedoch wechselt die Gratlage zwischen den Schnittufern [40].

Die Stufenfolge ist so auszulegen, dass der Kraftschwerpunkt, der sich aus den einzelnen Schneid- und Umformoperationen ergibt, möglichst in der Werkzeugmitte bzw. in der den Symmetrieebenen des Pressentischs befindet, um Moment und daraus resultierende Querkräfte auf die Führungen des Werkzeuggestells zu vermeiden. Durch ein Verkippen der Werkzeuggesteile zueinander, kann es zu erhöhtem Werkzeugverschleiß durch einseitige Belastung kommen und im ungünstigsten Fall bei sehr kleinen Schneidspalten können Stempel und Matrize kollidieren. Im gerüsteten Zustand wird die Führung durch die Presse übernommen. Deren Führungen sind wesentlich stabiler im Vergleich zu den Werkzeugführungen, wodurch ein außermittiger Versatz des Kraftschwerpunkts kompensiert werden kann. Darüber hinaus trägt eine Stempelführung auf Bandlaufebene ebenfalls zur Präzision bei. Geometrien, welche hohe Anforderungen bzgl. ihrer Lage zueinander haben, werden bevorzugt zusammen in einer Stufe geschnitten, um so vorschubbedingte Ungenauigkeiten zu vermeiden und eine höhere Präzision zu erreichen. [37]

2.3 Scherschneiden

Bei der Verarbeitung von Blech erfolgen in der Regel mindesten eine oder mehrere Schneidoperationen. Insbesondere bei Folgeverbundprozessen bilden einhubige Scherschneid- und Umformoperationen eine hoch produktive Kombination. Die Definition des Scherschneidens ist nach DIN 8588 das „Zerteilen von Werkstücken zwischen zwei Schneiden, die sich aneinander vorbeibewegen“ [41]. Das konventionelle Scherschneiden wird auch als Normalschneiden [42] bezeichnet. Insbesondere das einhubige Scherschneiden, „bei dem der Schnitt entlang der gesamten Schnittlinie in einem Hub erfolgt“ [41], ist von zentraler Bedeutung für die effiziente Herstellung von Bauteilen mit mittleren bis großen Stückzahlen. Als Benennungskonvention hat sich etabliert mit Werkzeug assoziiert Aspekte mit der Stammsilbe „Schneid“ zu versehen, wohingegen werkstückseitige Benennungen die Stammsilbe „Schnitt“ enthalten [42].

Wesentliche Verfahren sind das Lochen, das Ausschneiden und das Abschneiden [43]. Sowohl das Lochen als auch das Ausschneiden sind durch eine geschlossene Schnittlinie gekennzeichnet, die Unterscheidung der Verfahren erfolgt anhand der Definition des Gutteils, welches als Schnittteil bezeichnet wird, und des Abfalls. Beim Abschneiden ist eine offene Schnittlinie charakteristisch und der Zweck ist die Vereinzelung von Bauteilen.

Der typische Aufbau eines Scherschneidwerkzeugs besteht aus einem Schneidstempel, der Matrize und dem dazwischenliegenden Blech. Der zwischen Matrize und Stempel verbleibende Spalt wird als Schneidspalt u bezeichnet. Da ein starker Zusammenhang zwischen dem Schneidspalt u und der Blechdicke s_0 bzgl. des Schneidergebnisses besteht, wird dieser oftmals als relativer oder bezogener Schneidspalt u/s_0 in % angegeben.

Der Schneidvorgang verläuft in mehreren charakteristischen Phasen. Die Einteilung in der Literatur variiert zwischen fünf Phasen in [42] und [44] und bis zu neun Phasen [45], da die einzelnen Ereignisse unterschiedlich zusammengefasst werden. Die wesentlichen Vorgänge lassen sich wie folgt zusammenfassen und mit dem Stoßelkraftverlauf in Bild 5 a) korrelieren.

Bei einem Schneidvorgang mit Niederhalter wird zunächst die Niederhalterkraft F_{NH} aufgebaut. Es folgt das Aufsetzen des Stempels und die elastische Verformung des Blechs, was mit dem linearen Kraftanstieg in Abschnitt 2 verbunden ist. Der Übergang zu Abschnitt 3 markiert den Beginn der eigentlichen Schneidphase. Mit dem Überschreiten der Fließspannung des Blechwerkstoffs dringt der Stempel in das Blech ein und im Zuge der

plastischen Deformation entsteht der charakteristische Kanteneinzug an der Blechoberseite. Es treten tangentielle Zugspannungen und radiale Druckspannungen auf [46].

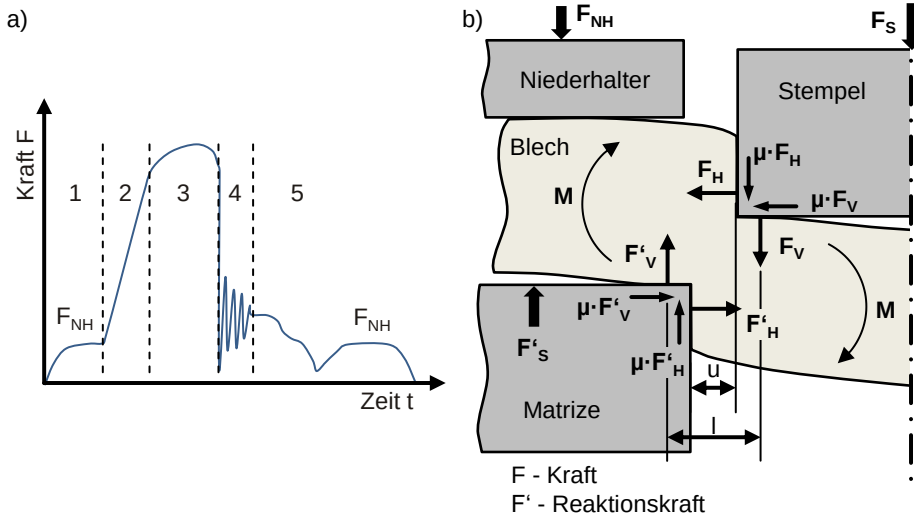


Bild 5: a) Charakteristischer Kraftverlauf beim Scherschneiden nach [44] sowie b) Kräfte und Spannungen beim Scherschneiden nach [45] und [44]

Mit dem weiteren Eindringen des Stempels und den zunehmenden Scherspannungen erfolgt das Abscheren des Blechs, wodurch sich die sogenannte Glattschnittzone bildet. Während der Scherung wird das Kraftmaximum erreicht. Im weiteren Verlauf erhöhen sich die Zugspannungen im Restquerschnitt, bis das Formänderungsvermögen des Werkstoffs erschöpft ist. Infolgedessen bilden sich Risse im Werkstoff, welche in der Regel zunächst von der Matrize ausgehen, da sich in diesem Bereich Zug- und Biegespannungen überlagern. Üblicherweise bildet sich ein zweiter Anriss von der Stempelkante aus. Bei einem richtig abgestimmten Schneidspalt laufen die beiden Risse aufeinander zu, bis diese zusammentreffen und das Werkstück getrennt wird. Mit der vollständigen Trennung kommt es in Abschnitt 4 zu einem schlagartigen Kraftabfall, infolgedessen das System aus Werkzeug und Presse zum Schwingen angeregt wird, was auch als Schnittschlag bezeichnet wird [44]. Die entstandene Fläche an der Schnittkante wird als Bruchzone bezeichnet. In der anschließenden Phase durchstößt der Stempel das Blech vollständig, wodurch der abgetrennte Ausschnitt ausgeworfen wird. Infolge der Werkstofftrennung werden elastische Spannungen frei, wodurch das Blech zurückfedert und am Schneidstempel anliegt. Zusammen mit der Relativbewegung von Stempel und Blech werden

Maß- und Formänderungen des Schnittteils bewirkt [42]. Abschließend erfolgt in Abschnitt 5 das Durchschieben bis zum unteren Totpunkt und der anschließende Rückhub, was durch Reibkräfte zwischen Stempel und Blech bestimmt ist.

Die durch den Stempel aufgebraachte Schneidkraft wirkt nicht direkt an den Kanten, sondern verteilt in einem schmalen Bereich entlang Schneidkanten von Stempel und Matrize [45]. Entsprechend der Darstellung in Bild 5 b) teilt sich die eingeleitete Schneidkraft in eine vertikale und eine horizontale Kraftkomponente. Über die Vertikalkraft F_V wird die Scherschubspannung im Werkstück induziert, welche somit zentralen Anteil an der Werkstofftrennung hat. Gleichzeitig treten infolge der radialen Werkstoffverdrängung Horizontalkräfte F_H im Werkstück auf. Aufgrund der um den Abstand l versetzten Kraftangriffspunkte von F_V und F'_V entsteht ein Moment, welches zu einem Aufwölben des Blechs führt. Darüber hinaus wirken Reibkräfte an den Seitenflächen sowie an den Stirnflächen der Schneidwerkzeuge. Die Reibkräfte leiten sich über die Reibzahl μ nach dem Reibgesetz von Coulomb aus den horizontalen und vertikalen Kraftkomponenten ab und bedingen im Wesentlichen den Werkzeugverschleiß. [45]

Für die Berechnung der maximalen Schneidkraft $F_{S\max}$ beim vollkantigen Schneiden hat sich auf Basis von Erfahrungswerten die folgende Formel etabliert:

$$F_{S\max} = k_S \cdot A_S = k_S \cdot (l_S \cdot s_0) \quad (1)$$

Diese bildet im Wesentlichen den Zusammenhang zwischen dem Schneidwiderstand k_S und dem zu trennenden Querschnitt A_S ab [45]. Die Scherfläche A_S ergibt sich aus dem Produkt der Blechdicke s_0 und der Länge der Schnittlinie l_S . Der Schneidwiderstand k_S ist wesentlich durch die Festigkeit des Werkstoffs bestimmt, wird aber durch Werkzeugparameter, Schnittteilgeometrie und weitere Parameter, z. B. Schmierung und Temperatur, beeinflusst [42]. Die Beziehung Schneidwiderstand k_S und der im Zugversuch ermittelten Zugfestigkeit R_m mittels eines Korrekturfaktors geht auf die Untersuchung von Bach zurück [47]. Darauf basiert der etablierte Zusammenhang:

$$k_S = 0,8 \cdot R_m \quad (2)$$

Darauf aufbauend entwickelten Romanowski [48] und Guidi [49] erweiterte Ansätze mit zusätzlichen Korrekturfaktoren für Prozesseinflüsse. Eine Zusammenstellung der unterschiedlichen Ansätze findet sich in [43]. In der Literatur finden sich Korrekturwerte im Bereich von 0,65 bis 0,9, wobei für

duktilen Werkstoffe tendenziell höhere Werte und für höherfeste und spröde Werkstoffe eher kleinere Werte gewählt werden [37].

Als Folge des beschriebenen Prozessablaufs bildet sich die charakteristische Schnittkantengeometrie aus. Diese ist gekennzeichnet durch den Kanteneinzug, die Glattschnittzone, die Bruchzone und dem Schnittgrat. Die geometrische Beschreibung erfolgt anhand der in Bild 6 dargestellten Schnittflächenkenngrößen. Da die Glattschnittzone meist als Funktionsfläche dient, wird tendenziell ein großer Glattschnittanteil und gleichzeitig möglichst kleine Anteile an Kanteneinzug, Bruchzone sowie Grat angestrebt.

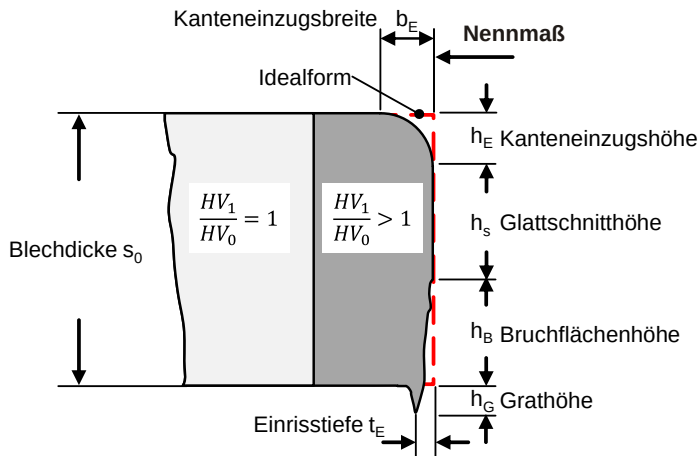


Bild 6: Schnittkantengeometrie nach [50]

Der Kanteneinzug wird durch die Kanteneinzugsbreite und -höhe bestimmt. Er wird neben dem Werkstoff, der Blechdicke und dem Schneidspace auch durch das Streckgrenzenverhältnis R_e/R_m beeinflusst. Der Kanteneinzug nimmt mit größerem Schneidspace zu [49]. Nach Untersuchungen von Hoogen [51] an Aluminiumlegierungen führt ein großes Streckgrenzenverhältnis zu einer geringeren relativen Kanteneinzugshöhe h_E/s_0 . Den mitunter stärksten Einfluss hat die Blechdicke, hier nimmt mit größerer Blechdicke der Kanteneinzug überproportional zu [52]. Mit zunehmendem Verschleiß und somit einer Verrundung der Schneidkante geht eine Vergrößerung der Kanteneinzugshöhe einher [53]. Der Glattschnittanteil h_s/s_0 wird wesentlich durch den Schneidspace und das Umformvermögen des Werkstoffs beeinflusst. Bei kleinen Schneidspace kommt es zu einer Überlagerung von Druckspannungen in der Scherzone, wodurch das Werkstoffversagen hin zu höheren Umformgraden verschoben wird, was einen größeren Glattschnittanteil begünstigt [54]. Darüber

hinaus wird in diesem Bereich auf das Nennmaß des Bauteils ermittelt. In der Regel wird ein möglichst großer Glattschnittanteil angestrebt, beim Scherschneiden werden je nach Werkstoff 20 - 60 % Glattschnitt erreicht [37]. Die Bruchfläche entsteht durch die Rissbildung im Werkstoff während des Schneidvorgangs. Tendenziell erhöht sich der Bruchflächenanteil mit zunehmenden Schneidspalt. Des Weiteren kann für ein hohes Streckgrenzenverhältnis ein höherer Bruchflächenanteil h_B/s_0 beobachtet werden [51]. Der Grat entsteht durch das Abreißen des Werkstoffs am Ende des Schneidvorgangs. Es wird sowohl vom Schneidspalt als auch vom Zustand der Schneidaktivteile beeinflusst. Mit zunehmender verschleißbedingter Schneidkantenradien nimmt die Grathöhe zu [51]. Bei scharfen Schneidkanten mit einem Kantenradius von etwa $9\text{ }\mu\text{m}$ ist der Einfluss des Schneidspalts nicht erfassbar [51]. Darüber hinaus kommt es als Resultat der Kaltverfestigung während des Schneidvorgangs zu einer Festigkeitssteigerung im Randbereich. Es tritt überdies auch eine unterschiedliche Härteverteilung über die Blechdicke auf. Dabei treten verfestigte Bereiche mit dem bis zu 2,25-fachen der Grundhärte auf [55]. Die am stärksten verfestigten Bereiche liegen im unteren Drittel der Schnittfläche im Bereich der Bruchfläche [55]. Der Schneidspalt ist eine zentrale Stellgröße beim Scherschneiden und nimmt neben dem Werkstoff den größten Einfluss auf den Schneidprozess. Industriell gebräuchlich sind bezogene Schneidspalte im Bereich 5 – 10 % [56]. Gerade bei kleinen relativen Schneidspalten kann das Phänomen auftreten, dass die von Stempel und Matrize ausgehenden Risse sich nicht treffen und aneinander vorbeilaufen. Infolgedessen entstehen mehrere Bruchflächen, welche von glattgeschnittenen Bereichen unterbrochen werden [57].

Während die Untersuchung grundlegender Aspekte des Scherschneidens Schwerpunkt der Forschungsarbeit des 20. Jahrhundert waren, liegt der Fokus aktueller Arbeiten auf der Verbesserung der Schneidprozesse im Hinblick auf Qualität und Effizienz sowie die Auswirkungen des Schneidprozesses auf die resultierenden Bauteileigenschaften und auf nachfolgende Prozessschritte.

Im Zusammenhang mit dem Scherschneiden von Aluminium ist die Flitterbildung ein unerwünschter Effekt. Als Flitterbildung wird das Ablösen von kleinen, losen Partikeln während des Schneidvorgangs vom Aluminiumblech bezeichnet [58]. Diese losen Partikel können zu Oberflächendefekten durch Einprägen führen, was insbesondere bei Sichtbauteilen ein Ausschusskriterium darstellt. Aufgrund der umfangreichen Verarbeitung von Aluminium als Leichtbauwerkstoff ist die Analyse der Flitterbildung und deren Vermeidung Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten. Erste

grundlegende Untersuchungen zur Entstehung von Flittern in Abhängigkeit unterschiedlicher Schneidbedingungen wurden von Erdmann [59] an AA 6016 ohne Schmierstoff durchgeführt. Es wurde die Relativbewegung des Schneidstempels und Glattschnittbereichs der Schnittkante als kritisch identifiziert. Daraus folgt die Empfehlung, dass die Relativbewegung gering gehalten und somit ziehende Schnitte und große Eintauchtiefen vermieden werden sollten. Damit verbunden erweist sich eine spröde Blechtrennung mit hohem Bruchanteil und somit reduziertem Kontaktbereich vorteilhaft bzgl. einer geringen Flitterbildung [59]. In dem Zusammenhang ist die Adhäsionsneigung von Aluminium ein entscheidender Einflussfaktor auf die Flitterbildung. In Krinninger et al. [60] wird festgestellt, dass mit zunehmender Wärmezufuhr die Adhäsionsneigung verstärkt wird. Anhand von Versuche mit AA6014 bei offenem Schnitt wurde ein kleiner Schneidspalt und scharfe Schneidkanten als vorteilhafte Bedingungen für die Reduzierung der Flitterbildung identifiziert [60]. In [61] wurden von Krinninger Ansätze zur Reduktion der Wärmeentwicklung untersucht. Hierzu wurde die entstehende Flittermenge in Abhängigkeit unterschiedlicher Schneidparameter quantitativ bestimmt. Als relevante Einflussgrößen für eine verstärkte Flitterbildung wurden der Schneidspalt, wenn es zur Sekundärglattschnittbildung kommt, und ein großer Schneidkantenradius genannt. Entgegen der weitverbreiteten Annahme konnte gezeigt werden, dass der Grat am Bauteil nicht für eine erhöhte Flittermenge ursächlich ist [61].

Die Kantenrissempfindlichkeit im Zusammenhang mit dem Schneidprozess ist ein wichtiger Faktor für eine nachgelagerte, fehlerfreie Umformung. Mit dem zunehmenden Einsatz hoch- und höchstfester Stahlgüten im Automobilbau gehen verstärkte Forschungsaktivitäten zum Einfluss des Schneidprozesses auf die Kantenrissempfindlichkeit einher. In [62] werden grundsätzliche Erkenntnisse zur Kantenrissempfindlichkeit zusammengefasst und die Ausbildung Scherschneideinflusszone, als die entscheidende Einflussgröße auf die Umformbarkeit der Schnittkante dargelegt. In [63] wurde für den Dualphasenstahl DP800 im Zusammenhang mit einer nachfolgenden Biegeoperation gezeigt, dass eine starke Abhängigkeit der Orientierung der Bruchzone in Bezug auf die Biegezone sowie der Anisotropie besteht. Untersuchung der Kantenrissempfindlichkeit von DP800 und AA5182 in Abhängigkeit unterschiedlicher Schneidverfahren und verschiedener Dehnungszustände bei der Umformung ist Gegenstand in [64]. Es wurde festgestellt, dass das Scherschneiden die Kantenrissempfindlichkeit erhöht und dass diese mit kleinerem Schneidspalt zunimmt [64]. Von Zhan et al. [65] wurde ebenfalls die Wechselwirkung des Schnittkantenzustands

und dem Versagensverhalten von mikrolegiertem Stahl an gelochten Zugproben analysiert. Es wurde ein Wechsel des Versagensverhaltens von duktilem zu sprödem Versagen beobachtet und es wird angenommen, dass dies auf Scherrisse in der Scherschneideinflusszone zurückzuführen ist [65]. Ein Ansatz zur Reduzierung der Kantenrissempfindlichkeit mittels Nachschneidens wird in [66] präsentiert. Durch das Nachschneiden schergeschnittener Löcher konnten die Bedingungen für ein anschließendes Kragenziehen des Complexphasenstahls HDT780C verbessert werden. In [67] wurde daher gezielt der zweistufige Schneidprozess aus Vorlochen und Nachschneiden eines Rings hinsichtlich des Einflusses der Ringbreite untersucht. Hierbei wurden das größte Lochaufweitverhältnis für eine Nachschneidzugabe von 30 % der Blechdicke erreicht [67]. Die Erweiterung des Ansatzes von einem zwei- auf einen dreistufigen Schneidvorgang führte zu einer weiteren Erhöhung des Lochaufweitverhältnisses, was in Kragenziehversuchen für den Complexphasenstahl CP-W 800 nachgewiesen wurde [68]. In Untersuchungen zum Einfluss unterschiedlicher Schneidparameter auf das Ermüdungsverhalten von DP800 bei zyklischer Belastung wurde nachgewiesen, dass das Schneidverfahren maßgeblichen Einfluss hat [53]. Hierbei wurde ebenfalls durch einen mehrstufigen Schneidprozess, insbesondere beim Nachschneiden mit geringer Materialzugabe, die Belastbarkeit erhöht [53].

Der Einfluss einer Abschneidoperation mit offenem Schnitt auf die Kantenrissempfindlichkeit auf Dualphasenstahl DP980 in Abhängigkeit unterschiedlicher Schneidspalte ist Gegenstand in [69]. Hierbei wurde ein relativer Schneidspalt von 10 – 15 % als vorteilhaft für ein großes Lochaufweitverhältnis und eine geringe Kantenrissempfindlichkeit identifiziert [69]. In Untersuchungen mit zwei verschiedenen Stählen der Stahlgüte DP980 wurde trotz vergleichbarer mechanischer Eigenschaften deutliche Unterschiede bzgl. der Kantenrissempfindlichkeit festgestellt [70]. Dies wurde auf die unterschiedliche Korngröße und Martensitverteilung zurückgeführt, wobei der Stahl mit geringer Korngröße und feineren Martensitpartikeln eine höher Kantenrissempfindlichkeit aufweist und sensibler auf die Variation des Schneidspalts reagiert [70]. In Untersuchungen zur Kantenrissempfindlichkeit von 6000er-Aluminiumlegierungen wurde ebenfalls festgestellt, dass trotz konstanter Bedingungen während des Abschneidprozesses eine starke Abhängigkeit der Kantenrissempfindlichkeit von der verwendeten Aluminiumlegierung besteht [71].

Zur Beurteilung der Kantenrissempfindlichkeit ist das einzige genormte Verfahren der Lochaufweitversuch nach ISO 16630 [72]. Während in [64] gelochte Nakajima-Tests mit gelochten Proben durchgeführt wurden, um

den Einfluss unterschiedlicher Umformbedingungen zu untersuchen, wurde in [73] eine Prüfmethode auf Basis eines modifizierten Zugversuchs vorgestellt. Bei dem Test werden Zugprobe eingesetzt, welche eine spanend bearbeitete und eine schergeschnittene Probenflanke aufweisen [73]. Damit ist es möglich, ein duktilen Versagen und Versagen durch Kantenrisse zu differenzieren [74]. Ein weiteres Verfahren für die Beurteilung der Kantenrissempfindlichkeit an gelochten Zugproben wird in [75] vorgestellt. Mit diesen können Einflüsse durch die Walzrichtung, die Probengeometrie und den Scherschneidprozess bestimmt werden. Voraussetzung ist jedoch eine exakt zentrische Platzierung der Lochung in der Probe [75].

Aufgrund der zunehmenden Elektrifizierung des Antriebsstrangs im Automobil gewinnt die Herstellung effizienter Elektromotoren an Bedeutung, daher sind in dem Zusammenhang Kenntnisse zum Einfluss der Fertigungsverfahren bei der Verarbeitung von Elektroblech relevant. Umfassende Untersuchungen zum Einfluss des Scherschneidprozesses auf die elektromagnetischen Eigenschaften von Elektroblechen wurden von Weiss et al. durchgeführt [76]. Es wurde gezeigt, dass der Schneidspalt und der Verschleißzustand des Stempels in Form des Schneidkantenradius Einfluss auf die elektromagnetischen Eigenschaften und die Eisenverluste haben [77]. In erweiterter Untersuchung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Blechdicken, Materialgüten und Schneidparameter wurde nachgewiesen, dass der Anteil der Schnittlinienlänge bezogen auf das Bauteilvolumen einen deutlichen Einfluss hat. Ein hoher relativer Anteil führt zu höheren magnetischen Verlusten [76]. Darüber hinaus wurde der Zusammenhang zwischen einer hohen Zugfestigkeit des Elektroblechs und einer höheren Empfindlichkeit der elektromagnetischen Eigenschaftsänderung nachgewiesen, wodurch Einflüsse durch verschlissene Werkzeuge sich stärker auf den elektromagnetischen Verlust auswirken. Grundsätzlich wurde festgestellt, dass durch einen kleinen Schneidspalt und scharfe Schneidaktivteile die elektromagnetischen Verluste reduziert werden können [76]. In [78] wurde gezeigt, dass die magnetischen Verluste sowohl von der Anregungsfrequenz des Elektroblechs als auch von den Schneidparametern abhängen. Grundsätzlich sind ein kleiner Schneidspalt unter $35\text{ }\mu\text{m}$ und scharfe Schneidkanten vorteilhaft [78]. Bei der Konzeption des Schneidprozesses sollte aber sowohl das Elektromotorendesign als auch die wirtschaftliche Bewertung im Hinblick auf die zu fertigende Stückzahl berücksichtigt werden [78]. Im Zusammenhang mit dem Scherschneiden von Elektroblech wird in [79] ein schmierstofffreier Schneidprozess mit Nullspalt vorgestellt. Durch die Verwendung plasmanitrierter Schneidstempel wurde trotz des

tendenziell spröden Bruchverhaltens von Elektroblech ein Glattschnittanteil von über 85 % und ein Grat kleiner 10 % der Blechdicke erreicht [79]. Zur Bewertung des Einflusses des Schneidprozesses auf die resultierenden Eigenspannungen in der Schnittkante verwendet Weiss [78] für die Simulation mit der Software Abaqus ein implementiertes duktils Schädigungskriterium. Ein vergleichbares Vorgehen wird auch in [80] vorgestellt. Hierbei wird die Software DEFORM eingesetzt und das Cockcroft-Latham-Schädigungsmodell für die Untersuchung unterschiedlicher Zustände der Schneidkante beim Scherschneiden von Elektroblech vorgeschlagen und experimentell validiert [80].

Eine umfassende Zusammenfassung der Forschungsaktivitäten im Zusammenhang mit dem Scherschneiden hoch- und höchstfester Stahlgüten findet sich in [81]. Hierbei wird auf verschiedene Verfahren zur Erhöhung der Schnittkantenqualität und der Einfluss der Wasserstoffversprödung bei hochfesten Stählen eingegangen [81]. Im Zusammenhang des Schneidens höchstfester Stähle wird von Abe et al. [82] ein Prozess mit einem abgestuften Schneidstempel vorgestellt. Dadurch wurde die Standzeit des Schneidstempels im Vergleich zu konventionellen Stempeln erhöht. Gleichzeitig wurde eine reduzierte Schädigung der Schnittkante erreicht, wodurch die Umformbarkeit erhöht werden konnte [82]. In [83] wurde der Einfluss unterschiedlicher Wärmebehandlungsmethoden für 22MnB5 auf die Gratbildung beim Scherschneiden untersucht. Dabei sind das Einsatzhärten, das Plasmanitrieren und das Flammhärten Bestandteil der Untersuchungen. Es wurde festgestellt, dass die Gratbildung durch das Härten des Werkstoffs reduziert werden kann, wobei das Einsatzhärten den größten Effekt hat. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass nicht nur die Grathöhe, sondern die Ausbildung der Schnittkantengeometrie von der Wärmebehandlung abhängt [83]. Weiter wurde für 22MnB5 das Scherschneiden im warmen Zustand untersucht [84]. Das Werkstück wird dabei bei ca. 600 °C geschnitten und gleichzeitig im Werkzeug abgeschreckt [84]. Es wurde die Machbarkeit des Prozesses nachgewiesen, indem trotz der Abkühlung keine kritischen Stempelrückzugskräfte auftreten und es somit nicht zu einem verstärkten Verschleiß oder Stempelbruch kommt [84].

Neben den Forschungsaktivitäten zur Verbesserung Schnittkantenqualität im Bereich hochfester Stähle, mit denen sich mehrere Forschergruppen befassen, werden in aktuellen Arbeiten unabhängige Themenfelder im Zusammenhang mit dem Scherschneiden aufgegriffen. Unter anderem wird in [85] ein Ansatz zu Erhöhung des Glattschnittanteils beim Scherschneiden von dicken Edelstahlblechen mit 10 mm Blechdicke wird ein pulsierender Schneidprozess vorgestellt. Hierbei hebt der Schneidstempel zyklisch

ab, verweilt kurz und wird wieder aufgesetzt. Es wird davon ausgegangen, dass durch das Abheben ein Nachfließen des Schmierstoffs ermöglicht und dadurch eine permanente Schmierung an der hochbelasteten Stempelkante erreicht wird. Folglich wird eine Adhäsion des Edelstahls am Stempel unterbunden. Für ferritischen Edelstahl wurde dadurch eine Steigerung des Glattschnittanteils von etwa 30 % auf 90 % erreicht [85].

Der Kanteneinzug in Abhängigkeit der Kontur der Schnittlinie variiert, insbesondere an konvexen Stempelbereichen wie Eckradien. Üblicherweise wird dies durch eine lokale Variation des Schneidspalts angepasst. In [86] hingegen wird ein Ansatz mit lokal angepassten Schneidkanten des Schneidstempels vorgestellt. Durch ein Verrunden des Schneidkantenradius in den Eckbereichen des Stempels wurde ein gleichmäßiger Kanteneinzugs entlang der gesamten Schnittlinie erreicht [86].

Ein weiteres Qualitätsmerkmal schergeschnittener Bauteile ist ein möglichst kleiner Grat. Von Sachnik [87] wird daher ein zweistufiger Prozess aus Prägen einer Kerben und anschließendem Scherschneiden entwickelt und untersucht. Dieses Verfahren kann sowohl für den offenen als auch für den geschlossenen Schnitt angewendet werden. Die Voraussetzung für gratfreie Bauteile ist jedoch die exakte Positionierung und eine ausreichende Eindringtiefe der Kerbe [87].

Standzeit und Werkzeugverschleiß sind zentrale Aspekte gegenwärtiger Untersuchungen im Bereich Scherschneiden. Aktuelle Forschungsaktivitäten gliedern sich in Untersuchungen des Schneidprozesses und der Systemtechnik, welche Werkzeug und Presse umfasst. Die Temperaturentwicklung beim Scherschneiden und der Einfluss von Schneidgeschwindigkeit und Schneidspalt wurde in [88] untersucht. Bei einer Schneidgeschwindigkeit von 66 mm/s wurden Temperaturen von bis zu 300 °C beim Schneiden des mikrolegierten Stahls S355MC gemessen. Die Temperaturentwicklung nimmt mit kleiner werdendem Schneidspalt und höherer Schneidgeschwindigkeit zu, wobei die Schneidgeschwindigkeit einen stärkeren Einfluss hat als der Schneidspalt [88]. Aufbauend darauf wurde der Zusammenhang des Seebeck-Koeffizienten, welcher die thermoelektrischen Eigenschaften von Werkstoffpaarungen beschreibt, und dem Schneidprozess analysiert [89]. Es wurde festgestellt, dass ein kausaler Zusammenhang zwischen den thermoelektrischen Strömen und dem adhäsiven Verschleiß besteht. Eine geringe Differenz der Seebeck-Koeffizienten der Werkstoffe reduziert die Adhäsionsneigung, weshalb für eine Kombination aus Stempelwerkstoff 1.4301 und einer Aluminiumlegierung AA5083 eine Reduktion des adhäsiven Verschleiß um 22 % festgestellt werden konnte [89].

Im Zusammenhang mit dem Schnittschlag und der daraus folgenden Anregung des Werkzeugs und der Presse resultieren eine starke Geräuscentwicklung und hohen Relativbewegungen zwischen Schneidstempel und Werkstoff. Dies führt zu einem erhöhten Werkzeugverschleiß und einer Beeinflussung der Schnittkante. In aktuellen Untersuchungen werden die hohen Schallemissionen beim Schneiden höchstfester Stähle adressiert. In [90] werden daher unterschiedliche Stempelgeometrien beim Abschneiden im offenen Schnitt analysiert und die resultierende Lautstärke bestimmt. Durch den Einsatz kreuzender Schneiden kann im Vergleich zum vollkantigen Schnitt die schlagartige Anregung während des Schneidprozesses unterbunden werden und folglich die Schallemission auf ein Minimum reduziert werden [82]. Die Auswirkung des Einsatzes von Dämpfern mit magnetorheologische Flüssigkeit auf die Schnittkante wird in [91] untersucht. Durch diese Form der Dämpfer konnte eine höhere Gleichmäßigkeit der Schnittkanten im Vergleich zu hydraulischen Dämpfern erreicht werden [91]. Untersuchungen zur maschinenseitigen Schwingungsreduktion mittels eines adaptiven Tilgersystems werden in [92] präsentiert. Hierbei wird über piezoelektrische Aktoren die Dämpfung angepasst, wodurch den Schwingungen des Pressenstößels entgegengewirkt wird [92].

2.4 Prägen

Während die allgemeinen Verfahren der Umformtechnik, darunter das Fließpressen und das Tiefziehen, erst während der letzten drei Jahrzehnte eine Miniaturisierung erfahren haben und unter dem Begriff der Mikroumformtechnik zusammengefasst werden, werden mittels Prägen schon seit Tausenden von Jahren kleine Strukturen in Oberflächen umformtechnisch hergestellt [93]. Darunter werden auch Strukturdetails erzeugt, welche unter die Definition der Mikroumformung fallen, welche die umformtechnische Herstellung von Bauteilen oder Strukturen mit mindestens zwei Dimensionen im Submillimeterbereich beschreibt [94]. Dennoch wird das Prägen gemäß den DIN-Normen ohne Spezifizierung der Größenordnung vergleichbaren makroskopischen Verfahren, wie dem Gesenkformen [95] und dem Eindrücken [96] zugeordnet. Als allgemeine Definition kann das Prägen als ein Umformverfahren, bei welchem unter hohem Druck die Oberfläche an einem Werkstück verändert wird, beschrieben werden [97]. Das Vollprägen wird nach DIN 8583—4 als „Formpressen ohne Grat mit kleinen Höhen- bzw. Dickenabnahmen zwischen Formwerkzeugen, die das ganze Werkstück oder den zu prägenden Bereich umschließen“ charakterisiert [95]. Jedoch können erst mit dem Verständnis der Besonderheiten

der Mikroumformung bestimmte Effekte des Prägens nachvollzogen und verstanden werden. Daher erscheint es sinnvoll, beim Prägen auch den Blickwinkel der Mikroumformungsverfahren zu berücksichtigen [98]. Das Mikroprägen im Speziellen kann anhand der folgenden geometrischen Aspekte definiert und vom Prägen abgegrenzt werden [99]:

- Geringe Verhältnisse von Prägetiefe zu Restplattenhöhe
- Höhere Aspektverhältnisse der abgebildeten Strukturen
- Hohe geometrische Formgenauigkeit (bis kleiner $1\text{ }\mu\text{m}$)
- Kleine Strukturdetails (bis unter $10\text{ }\mu\text{m}$)

Das Prägen ist nach DIN 8580 [100] dem Druckumformen zugeteilt und kann als Massivprägen der Kaltmassivumformung zugeordnet werden [97]. Dieses wiederum kann weiter in das Vollprägen als Untergruppe des Gesenkformens nach DIN 8583 Blatt 4 [95] und das Einprägen als Teil der Eindrückverfahren nach DIN 8583 Blatt 5 [96] untergliedert werden. Davon abzugrenzen ist das Hohlprägen, welches als Zugumformen und Tiefen klassifiziert ist [101]. Damit ist das Verfahren der Blechumformung zuzuordnen. In der schematischen Darstellung in Bild 7 werden die Unterschiede der drei Verfahren verdeutlicht.

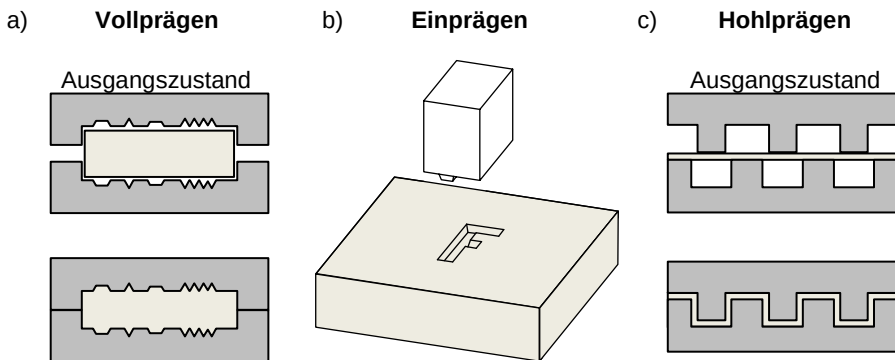


Bild 7: Schematische Darstellung von a) Vollprägen [95], b) Einprägen [96] und c) Hohlprägen [97]

Im Unterschied zum Massivprägen zeichnet sich das Hohlprägen dadurch aus, dass die ursprüngliche Werkstückdicke wie in Bild 7 weitestgehend erhalten bleibt und es lediglich durch ein Abstrecken während der Umformung zu einer Dickenabnahme kommt [102]. Im Gegensatz hierzu sind die wesentlichen Merkmale des Vollprägens, eine geringe Höhenabnahme und das Umschließen des Prägebereichs durch das Werkzeug [95]. Davon unterscheidet sich das Einprägen in der Hinsicht, dass in einem offenen Pro-

zess, ohne ein vollständiges Umschließen des Werkstücks, eine im Verhältnis zum Werkstück kleine Struktur in die Oberfläche eingedrückt wird [96]. Im Rahmen dieser Arbeit wird das Massivprägen und insbesondere das Einprägen untersucht, daher wird das Hohlprägen nachfolgend nicht näher behandelt.

Wissenschaftliche Veröffentlichungen zum Prägen finden sich nur vereinzelt in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhundert. In 1963 wird der Prägeprozess hinsichtlich der Formfüllung einer Nut mit unterschiedlichen Formen von Bocharov et al. [103] mit verschiedenen Lösungsverfahren der Plastomechanik analysiert und diese verglichen. Kiran und Shaw greifen diese Arbeiten 1983 auf und untersuchen mehrere nebeneinanderliegenden Strukturen im Zusammenhang mit der Münzherstellung [104]. Erst um das Jahr 2000, beginnend mit den Untersuchungen von Ike im Jahr 1998 [105], gibt es konzentrierte Aktivitäten bzgl. dem Prägen von Mikrostrukturen. Dies wurde in diesem Zeitraum zusätzlich durch den Forschungsschwerpunkt der Mikroumformung angetrieben. In Deutschland konzentrierten sich die Aktivitäten im Bereich Prägen und Mikroprägen um Prof. Schubert an der Technischen Universität Chemnitz und mit dem Schwerpunkt des umformtechnischen Strukturierens um Prof. Hirt an der RWTH Aachen. Die aktuell aktivste Forschergruppe formiert sich um Prof. Guo an der Harbin Universität in China. Auf die jeweiligen Arbeiten wird nachfolgend eingegangen.

Eine klare Abgrenzung und eindeutige Zuordnung von Massivprägeprozesse sind in der Literatur und der Praxis oftmals nicht möglich. Die Übergänge sind oft fließend insbesondere im Grenzbereich zu den Mikroumformverfahren. Es hängt schlussendlich vom Blickwinkel der Untersuchungen ab, ob ein Prozess zum Beispiel dem Prägen oder dem Mikrofließpressen zugeordnet wird. Aus diesem Grund soll nachfolgend keine strikte Trennung der unterschiedlichen Bereiche erfolgen und es werden sowohl Erkenntnisse im Bereich Prägen, der Mikroumformung sowie ähnliche Prozesse hinsichtlich der Prozesscharakteristik und der Strukturabmessung berücksichtigt.

2.4.1 Mikroprägen und Prägen

Erste systematische Untersuchungen zur Mikrostrukturierung mittels Prägen wurden von Ike et al. [105] durchgeführt. Das Prägen kann in zwei wesentliche Kategorien eingeteilt werden, zum einen in das Abbilden von Vertiefungen und zum anderen von erhabenen Strukturen [105]. Während das Abformen bei Vertiefungen mit dem direkten Kontakt von Werkzeug und

Werkstück verbunden ist, erfolgt die Ausformung erhabener Strukturen zunächst frei bis es im Zuge der Formfüllung zum Werkzeugkontakt kommt. Ike widmet sich in seinen Arbeiten der Umformung erhabener Struktur in einem Vollprägeprozess bei geschlossenem Werkzeug [105]. Hierbei wurde die Formfüllung eines regelmäßigen Musters runder Kavitäten untersucht. Die Versuche wurden an 2 mm dicken Aluminiumronden mit einem Durchmesser von 30 mm durchgeführt. Der Durchmesser der Kavitäten lag bei $175\text{ }\mu\text{m}$, die Tiefe betrug $28\text{ }\mu\text{m}$ bei einem Mittenabstand der Strukturen von $260\text{ }\mu\text{m}$. Es wurde festgestellt, dass erst bei Kontaktdrücken, welche größer sind als das 2,1-fache der Fließspannung, die Formfüllung in der Werkstückmitte beginnt. Eine vollständige Ausbildung der Zapfen bis in den Randbereich wird erst bei Kontaktdrücken oberhalb des 3,1-fachen der Fließspannung erreicht. Aus den Umformversuchen wurde gefolgert, dass zwei wesentliche Plastifizierungsprozesse ablaufen. Einerseits tritt eine oberflächennahe Umformung auf, bei der eine Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug stattfindet. Durch diese werden die Zapfen ausgeformt werden. Andererseits findet eine Plastifizierung des gesamten Werkstücks entsprechend einer Massivumformung statt, was wiederum zu einem starken radialen Werkstofffluss führt. Infolgedessen kommt es zu einer ungleichen Formfüllung der Kavitäten, welche zum Rand hin zunimmt. Bei hohen Kontaktdrücken in Verbindung mit radialem Werkstofffluss tritt ein Abscheren der Zapfen auf, da deren radiale Bewegung durch die Kavitäten des Stempels gehindert werden. In Abhängigkeit vom Einsatz von Schmierstoffen kommt es in diesem Zusammenhang zu einem Wechsel aus Abscheren und Kaltverschweißungen der Strukturen [105]. In weitere Untersuchungen wurde mit einer sternförmigen Anordnung von Kavitäten auf dem Prägestempel mit unterschiedlichen Durchmessern zwischen 0,05 mm und 1,6 mm das Füllverhalten in Abhängigkeit der radialen Position und des Durchmessers der Kavität analysiert [106]. Es wurde festgestellt, dass bei Kontaktdrücken größer als das 2,9-fache der Fließspannung die Ausformung der Kavitäten beginnt, welche zunächst unabhängig von der radialen Position ist. Erst bei dem 3,75-fachen der Fließspannung beginnt die Plastifizierung der gesamten Proben, in diesem Zusammenhang wird die Formfüllung der Kavitäten deutlich angeregt. Darüber hinaus wurde aus den Ergebnissen ein Zusammenhang zwischen der Zapfenhöhe und der radialen Position sowie dem Durchmesser der Kavität abgeleitet. Die Zapfenhöhe ist tendenziell in der Stempelmitte am höchsten und nimmt radial ab. Dies gilt vor allem für die großen untersuchten Durchmesser. Für kleine Durchmesser nimmt die Zapfenhöhen ebenfalls zunächst ab, steigt jedoch im Randbereich der Probe wieder an. Die Verteilung der Höhe bei mittleren Durchmessern ist überwiegend

gleich. Für große Durchmesser wurde außerdem eine verzögert einsetzende Formfüllung beobachtet, woraus geschlossen wurde, dass für das Füllen von Kavitäten mit größerem Volumen eine Massivumformung des gesamten Werkstücks notwendig ist [106].

In [107] fasst Ike die Erkenntnisse seiner Untersuchungen zusammen und leitet drei wesentliche Effekte für das Prägen ab. Dabei verweist er auf eigene Arbeiten, in denen der Einfluss einer Massivumformung auf die Formfüllung untersucht wird, indem bei Aluminiumproben sowohl eine gezielte Massivumformung als auch eine nahezu vollständige Unterdrückung dieser herbeigeführt wird. Dies geschieht in einem zweistufigen Prozess, indem die Proben zunächst mit glatten Stempeln gestaucht werden, so dass eine vollständige Wandanlage entsteht und dadurch der radiale Werkstofffluss während des anschließenden Prägens unterbunden wird. In diesem Fall erfolgt die Ausformung der Prägekontur durch die Umformung der Randschicht, wodurch nur geringe Aspektverhältnisse der ausgeformten Zapfen erreicht werden. Tritt hingegen eine Massivumformung des Werkstückvolumens auf, werden deutlich größere Aspektverhältnisse erreicht. In [108] wurde mittels numerischer Untersuchungen an runden Rohlingen aufgezeigt, dass Rohlinge mit Fase einen positiven Einfluss auf die geprägte Geometrie hat. Mit den Erkenntnissen von Ike kann dies dadurch erklärt werden, dass die Fasen am Rohling einen radialen Stofffluss ermöglichen und somit die Massivumformung des Rohlings begünstigen, wodurch die Ausformung der Prägekontur angeregt wird. Ike teilt die Besonderheiten beim Prägen in die folgenden Gruppen ein:

Effekt des Kontaktdrucks: Aufgrund der hohen Kontaktnormalspannungen können Reibschubspannungen, welche gleich der Scherfließspannung des Werkstoffs sind, an den Grenzflächen von Werkstück und Werkzeug auftreten. Dadurch kann es sowohl zu einer Relativbewegung in Form von Gleiten als auch zur Scherung im Werkstoff kommen. Durch die unterschiedliche Verteilung von Normal- und Tangentialspannungen kann zu lokal unterschiedlichen Bedingungen kommen, was einen Wechsel zwischen Gleiten und Scherdeformation bewirken kann. [107]

Effekt der Massivumformung: Die Ausbildung großer Aspektverhältnisse beim Prägen wird durch eine Massivumformung des Werkstückvolumens gefördert. Hierfür sind eine größere Probendicke und ein ungehinderter lateraler Stofffluss vorteilhaft. Dies wiederum unterstützt die Ausformung höherer Zapfen. Wird die Massivumformung unterdrückt, reduziert sich die Plastifizierung auf die oberflächennahe Randzone, was in geringen Aspektverhältnissen der umgeformten Zapfen resultiert. [107]

Effekt des Gleitens: Entgegen der Annahme der Haftung bei Reibschubspannungen oberhalb der Scherfließgrenze tritt auch beim Übersteigen der Fließspannung eine Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück auf, was sich in der Einglättung der Oberfläche widerspiegelt. Das einsetzende Gleiten unterstützt das Ausformen von Strukturen, führt jedoch zu einer ungleichen Füllung von Kavitäten. Im Extremfall kann ein Abscheren von Strukturen durch Gleiten auftreten, wenn die Relativbewegung durch die Werkzeugkontur behindert wird. [107]

Der Einfluss Probengeometrie in Form der Probendicke im Zusammenhang mit einsetzender Massivumformung wird für rostfreien Stahl in [109] bestätigt. Je größer die Materialdicke und besser die Möglichkeit des lateralen Materialflusses, desto höhere Aspektverhältnisse der Strukturen können erreicht werden. Über die grundlegenden Effekte, die beim Prägen beobachtet werden können, hinaus hat die Geometrie des Werkzeugs und der Prägestruktur einen starken Einfluss auf die Formfüllung, die Abbildungsgenauigkeit und die auftretenden Prozesskräfte. Der Einfluss von Geometrieparametern beim Prägen von Mikrokanalstrukturen wurde von Rattay [110] simulativ und experimentell untersucht. Hierbei wurden beidseitig gerade Strukturen in einem offenen Prägeprozess in Aluminium (Al99,5 und AlMg3), Messing (CuZn37) und Stahl (X5CrNi810) umgeformt. Hierbei kommt es, wie in Bild 8 dargestellt, zu einer globalen Reduktion der Blechdicke und einer gleichzeitigen Füllung von Rippen.

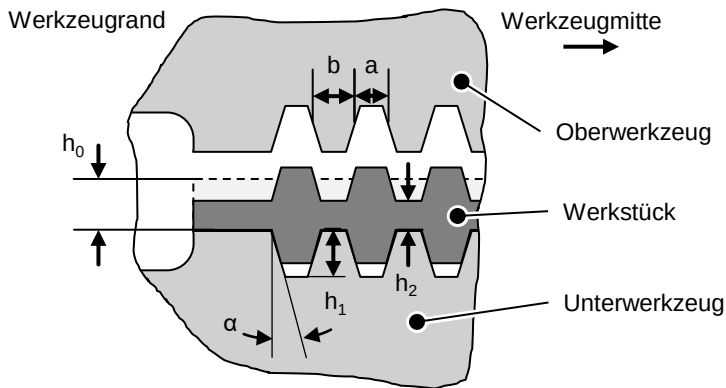


Bild 8: Schematische Darstellung von lokalen Geometrieparametern von Prägewerkzeug und Werkstück nach [111]

Bei den Untersuchungen wurde der Flankenwinkel zwischen 7° und 27° , die Rippenbreiten von $100\ \mu\text{m}$ bis $400\ \mu\text{m}$ und die Rippenhöhen zwischen $200\ \mu\text{m}$ und $400\ \mu\text{m}$ variiert. Es zeigt sich, dass diese zu einer charakteris-

tischen Ausbildung der Geometrie führen. Als signifikant gelten werkzeugseitig der Flankenwinkel α der Entformungsschrägen, das Aspektverhältnis von Nuttiefe h_1 zu Nutbreite a und das Verhältnis von Nutbreite a zu Nutabstand b [111]. Der Flankenwinkel wirkt sich in der Weise aus, dass bei sonst konstanten Parametern ein größerer Flankenwinkel die Formfüllung hemmt. Dies wird auf die Vergrößerung der projizierten Kontaktfläche zurückgeführt.

Das Aspektverhältnis der ausgeformten Rippen wird durch das Verhältnis Nuttiefe und -breite h_1/a beeinflusst. Ein größeres Aspektverhältnis wird bei gleicher Kraft und einem größeren Verhältnis h_1/a erreicht. Dieser Effekt ist unabhängig vom Flankenwinkel. Der Abstand der Rillen im Werkzeug beeinflusst die Formfüllung dahingehend, dass bei einem geringen Verhältnis von Breite und Abstand der Nuten a/b , also einem größeren Abstand der Nuten im Werkzeug, größere Kräfte nötig sind, um eine vergleichbare Ausformung der Rippen zu erreichen. Die größere Ausgangskontaktfläche wird hierfür als Ursache angeführt, da dadurch die Flächenpressung verringert wird und somit höhere Kräfte erforderlich sind, um die Fließgrenze zu erreichen [111]. Darüber hinaus zeigen simulative Untersuchungen eines Voll-Vorwärts-Fließpressprozesses von Rippenstrukturen, dass ein größerer Radius im Einlaufbereich der werkzeugseitigen Nuten, einen stärkeren Werkstofffluss in die Kavität erwarten lässt [112].

Neben dem lokalen Stofffluss und der Formfüllung tritt ein globaler Werkstofffluss beim Prägen auf. Die experimentellen Untersuchungen eines offenen Prägeprozesses von [110] zeigen einen lateralen Werkstofffluss sowohl längs als auch quer zu den geprägten Rippen auf. Der Werkstofffluss in Querrichtung setzt bereits bei geringeren Kräften ein, im Vergleich ist jedoch der Werkstofffluss längs zur Rippenstruktur am Prozessende stärker ausgebildet. Dieser Werkstofffluss ist gleichmäßiger bei quadratischen als bei rechteckigen Werkstücken, dennoch kann eine Fließbehinderung in Querrichtung durch die Werkzeugnuten festgestellt werden [110]. Darüber hinaus bewirkt der Stofffluss in Querrichtung eine Verformung des Stempels, besonders bei schmalen Rippen des Prägeeinsatzes, was zu einer Verzerrung der Soll-Geometrie der Kavität führt [110].

Aufbauend auf den Arbeiten von Rattay hat Thome das Prägen von Mikrokanalstrukturen im geschlossenen Werkzeug untersucht [113]. Auch im geschlossenen Werkzeug hat der globale Werkstofffluss Einfluss auf die Formfüllung. Es ist zu beobachten, dass diese mit radialer Position abnimmt, sowohl längs als auch quer zu den Rippen. Dies führt zu einer

ungleichmäßigen Formfüllung der Kavitäten im Randbereich [113]. Mit größeren Ausgangsblechdicken kann auch ein stärkerer globaler Stofffluss beobachtet werden. Infolgedessen ist eine höhere absolute Prägetiefe notwendig, um die gleiche Formfüllung wie bei dünneren Blechen zu erreichen, da durch den globalen Stofffluss weniger Werkstoffvolumen für die Ausformung der Rippen zur Verfügung steht. In diesem Zusammenhang zeigen die Untersuchungen von Schubert et al. [114], dass der globale Materialfluss durch einen kombinierten Umformprozess gesperrt werden kann. Bei diesem Verfahren wird zunächst durch Scherung, vergleichbar mit dem Anschneiden beim Konterschneiden, eine umlaufende Nut erzeugt, bevor die Prägegeometrie innerhalb der Nut ausgeformt wird. Durch diese Nut kann ähnlich dem Vorstauchen mit Wandanlage in [107] eine gleichmäßige Formfüllung über den gesamten Bereich erreicht werden kann.

Das Prägen als Kaltumformprozess wird neben der zu prägenden Struktur durch die Gestaltung des Prozesses hinsichtlich der Umformgeschwindigkeit und Schmierung beeinflusst. Die Umformgeschwindigkeiten der vorgestellten Untersuchungen zum Mikroprägen liegen mit einer Spanne von 0,012 mm/s für AL99,5 in [98] bis 0,2 mm/s für AlMg₃, CuZn₃₇ und X₅CrNi₁₈10 in [110] im quasi-statischen Bereich. Der Einfluss der Umformgeschwindigkeit im quasi-statischen Bereich wurde im Kontext des Mikroprägens bisher nicht gezielt behandelt. Untersuchungen zeigen jedoch, dass durch eine Hochgeschwindigkeits-Mikroumformung eine bessere Kalibrierung bei reduziertem Kraft- und Arbeitsbedarf erreicht werden, kann was in [115] und [116] bestätigt wird. Wesentlicher Mechanismus für diesen Effekt ist, dass es durch die Plastifizierung zur einer Erwärmung des Bauteils kommt und aufgrund der hohen Geschwindigkeit des Umformprozesses die entstandene Wärme nicht innerhalb des Prozessablaufs abgeführt werden kann. Dies führt zu einer thermischen Aktivierung des Werkstoffs, wodurch der Fließwiderstand herabgesetzt wird [116]. Darüber hinaus wird in [115] eine Abnahme der Reibung um ca. den Faktor 5 für Edelstahl bei Umformgeschwindigkeiten im Bereich von 500 s⁻¹ bis 1500 s⁻¹ beobachtet, was sich ebenfalls günstig auf den Umformprozess auswirkt. Dagegen wird für reines Aluminium neben einer geringen Abnahme des Fließwiderstands, eine deutliche Zunahme der Reibung für Geschwindigkeiten von 500 s⁻¹ bis 2000 s⁻¹ festgestellt.

Die Reibung wird von Ike als wichtiger Faktor beim Prägen identifiziert. In [105] werden Versuche mit geschlossenen Kavitäten sowohl mit als auch ohne Schmierstoff durchgeführt. Es zeigt sich, dass kein klarer Unterschied zwischen den beiden Varianten hinsichtlich der Formfüllung identifiziert

werden kann. Durch die Schmierung tritt verstärkt eine Relativbewegung von Werkzeug und Werkstück auf. Allerdings wird bei einer übermäßigen Schmierfilmdicke beobachtet, dass eine vollständige Füllung der Stempelkavitäten verhindert wird und es zu einer kugeligen Ausformung der Zapfen kommt. Grund hierfür sind geschlossene Schmierfilmdepots in den Stempelkavitäten und der hydrostatische Gegendruck des eingeschlossenen Schmierstoffs, der die Formfüllung verhindert. Daher wird eine Schmierfilmdicke in der Größenordnung der Rauheit des Werkstücks in [105] empfohlen. Rattay kann bei Verwendung von Schmierstoff tendenziell eine bessere Formfüllung feststellen [110]. Da die Werkzeuggeometrie aus offenen Nuten besteht, tritt der Effekt abgeschlossener Schmierstoffdepots nicht auf.

In Wang et al. [117] wurde der Einfluss der Korngröße auf die Formfüllung umgeformter Rippen untersucht. In Abhängigkeit der Korngröße im Verhältnis zu Breite der werkzeugseitigen Nut muss von einem unterschiedlichen Verhalten des Werkstoffs ausgegangen werden. Ist die Korngröße klein in Bezug auf die Nutbreite kann ein homogener Polykristall angenommen werden, ansonsten sollte bei einer Korngröße in der Größenordnung der Nutbreite und darüber die Umformung einzelner Körner berücksichtigt werden [117].

Von Qiao et al. [118] wurde erstmals die Verwendung von ultrafeinkörnigem Reinaluminium für das Prägen von Mikrokanälen im Bereich von 5 - 25 μm Breite untersucht. Hierfür wurde mittels Equal Channel Angular Pressing (ECAP) gezielt die Korngröße des Werkstoffs eingestellt. Es wurde vergleichend das Kalt- und Warmumformen analysiert und festgestellt, dass die Warmumformung die Formfüllung verbessert und mit ultrafeinkörnigem Gefüge eine gleichmäßige und glatte Oberfläche erzeugt werden kann [118]. In weiteren Untersuchungen der Gruppe wurde die starke Schädigung der Siliziumwerkzeuge beim Kaltumformen beschrieben. Darüber hinaus wurde die unzureichende Abbildungsgenauigkeit im Eckbereich der werkzeugseitigen Nuten trotz des Einsatzes von ultrafeinkörnigem Gefüge festgestellt [119]. In [120] wird das Prägen von ultrafeinkörnigem Reinaluminium, welches mittels ECAP hergestellt wurde, aufgegriffen. Es wurde die Formfüllung von Rippenstrukturen mit einer Breite zwischen 5 μm und 100 μm und einer Umformtemperatur von 250 $^{\circ}\text{C}$ untersucht und die Erkenntnisse in [118] und [119] bestätigt. Als Demonstrationsbauteil für die hohe Abbildungsgenauigkeit wird in [121] ein stilisiertes Turbinenrad präsentiert. Der Einfluss der Umformtemperatur auf die Formfüllung ist Gegenstand in [122]. Durch die erhöhte Prozesstemperatur

wird die Formfüllung verbessert, insbesondere ab einer Umformtemperatur von 200 °C wurde eine gesteigerte Formfüllung nachgewiesen [122]. In weiteren Untersuchungen von Su et al. [123] werden Proben aus ultrafeinkörnigem und grobkörnigem Aluminium bzgl. der Formfüllung verglichen und die Gefügeentwicklung analysiert. Der gezielte Vergleich von grob und ultrafeinkörnigem Aluminium zeigt, dass die resultierende Rippenhöhe bei konstanter maximaler Umformkraft für grobkörniges Aluminium höher ist, jedoch ist die Oberfläche und die Form der Rippenstruktur weniger gleichmäßig [123]. Während für grobkörniges Aluminium eine vollständige Formfüllung bereits bei einer Umformtemperatur von 200 °C erreicht wird, tritt dies für das ultrafeinkörnige Gefüge erst ab einer Temperatur von 250 °C auf [123]. Von der Forschergruppe in Harbin wurde in gleicherweise das Prägen von Reinkupfer bei erhöhter Temperatur untersucht [124]. In Erweiterung dieser Untersuchungen wurde in [125] versucht, hydrophobe Oberflächenstrukturen mittels Prägen zu erzeugen. Es konnte nachgewiesen werden, dass mittels Mikrostrukturen der Kontaktwinkel bei der Benetzung mit Wasser erhöht werden kann. Superhydrophobes Verhalten kann aber nur mit einer zusätzlichen Behandlung erreicht werden. Dennoch kann das Prägen von ultrafeinkörnigem Aluminium als Verfahren für die Massenproduktion funktionaler Oberflächen eingesetzt werden [125].

2.4.2 Kantenprägen

Neben dem Prägen von Strukturen findet der Prozess auch Anwendung für die Erzeugung definierter Kanten. Gerade im Zusammenhang mit Schneidoperationen, bei denen ein Schnittgrat auftritt, ist das Kantenverprägen ein Ansatz, um den Grat umformtechnisch zu entfernen [57]. Dies geschieht, indem der Schneidoperation ein Prägeprozess nachgelagert ist. Dieses Verfahren wurde von der Firma Feintool entwickelt und kommt vor allem beim Feinschneiden zum Einsatz. Untersuchungen zum Kantenverrunden mittels Prägen bei Scherschneidprozessen wurden von Achouri et al. [126] durchgeführt. Es wurden Proben aus mikrolegierten Kaltarbeitsstahl HSLA S500MC mit einer Blechdicke von 4 mm schergeschnitten und anschließend die Kanten mit Radien zwischen 1,25 mm und 2,25 mm geprägt. Der Untersuchungen sind motiviert durch die Gurtschlossherstellung, welche in einem Folgeverbundprozess abläuft und das Kantenprägen direkt in die Prozessfolge integriert werden kann. In Anlehnung daran verläuft die Werkzeugbewegung beim Kantenprägen normal zu Blechoberfläche. Es wird sowohl der Grat beseitigt als auch eine gleichmäßigere Kantenform ausgebildet. In den Untersuchungen wird vorrangig auf die Auswirkungen

des Kantenprägens auf die mechanischen Bauteileigenschaften eingegangen. Zum einen werden die Kanten durch das Kantenprägen verfestigt und zum anderen Druckspannungen im Kantenbereich eingebracht, was der Mikrorissbildung an der Schnittkante bei mikrolegierten Stählen entgegenwirkt. Beides sind wünschenswerte Effekte hinsichtlich eines dauerfesten Einsatzverhaltens. In Zugversuchen wurden höhere Fließspannungen im Vergleich zu ungeprägten Proben ermittelt, was auf die Kaltverfestigung durch das Prägen zurückgeführt wird [126]. Tendenziell wurden für größere Kantenradien höhere Festigkeiten und größere Druckeigenspannungen ermittelt [126].

2.4.3 Flachstauchversuch

Das Prägen ebener Bleche, insbesondere von geraden Rippen oder Nuten, weist eine hohe Ähnlichkeit mit dem Flachstauchversuch auf. Dieser ist gekennzeichnet durch eine streifenförmige Blechprobe, welche entsprechend Bild 9 durch zwei gegenüberliegende Stempel lokal gestaucht wird. Damit entspricht der Aufbau dem beidseitigen Einprägen einer Nut. Der Flachstauchversuch stellt ein vereinfachtes Modell eines Prägeprozesses dar, da die Probe sich ungehindert längen kann, was in der Regel bei technisch relevanten Einprägeprozessen nicht möglich ist. Daher können Effekte im Prägeprozess auf grundlegende Erkenntnisse des Flachstauchversuchs hinsichtlich Spannungen und Dehnungen zurückgeführt werden.

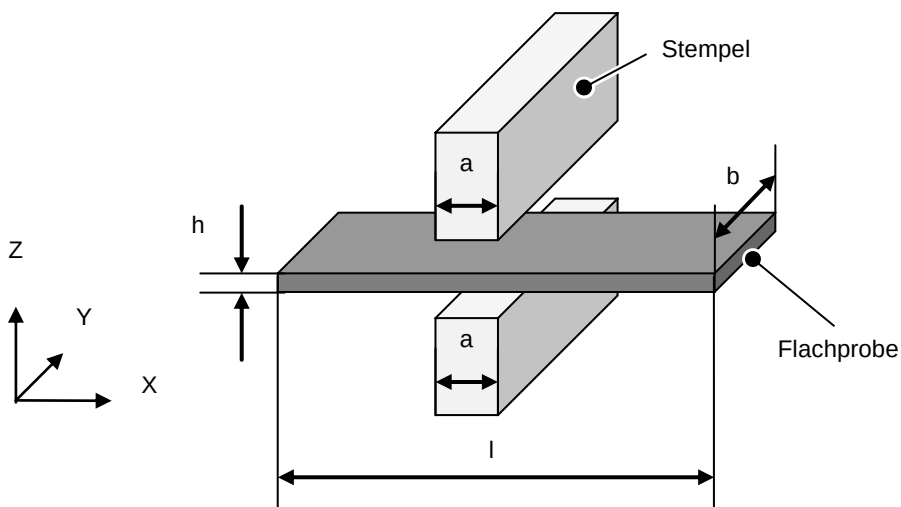


Bild 9: Schematische Darstellung des Flachstauchversuchs [127]

Der Flachstauchversuch zeichnet sich durch die Möglichkeit der Aufnahme von Fließkurve bis zu hohen Umformgraden aus und geht auf Arbeiten von Nádai [128] und Orowan [129] zurück. Im Gegensatz zum Zylinderstauchversuch ist die Bestimmung der belasteten Fläche deutlich vereinfacht, da diese unabhängig vom Stauchweg gleich bleibt [130]. Woraus sich vereinfacht die Fließspannung als

$$k_f = \frac{F}{b \cdot a} \quad (3)$$

ableiten lässt. Der Umformgrad φ kann direkt aus dem Stempelweg mit der folgenden Formel ermittelt werden [127]. Wobei h_0 die initiale und h die momentane Probendicke sind.

$$\varphi = \ln \frac{h}{h_0} \quad (4)$$

Ein weiteres Merkmal des Flachstauchversuchs ist, dass ein ebener Formänderungszustand angenommen werden kann, wenn die Probenbreite b deutlich größer ist als die Stempelbreite a und ein Verhältnis $b/a > 6$ vorliegt [131].

Nach Becker et al. [127] stehen den Vorteilen bei der üblichen Verwendung scharfkantiger Stempel die folgenden Nachteile gegenüber:

- Bei scharfkantigen Stempeln entsteht an den Längskanten eine Spannkonzentration, was zu einem frühen Probenversagen durch Bruch führen kann.
- Der Versuch ist sehr sensitiv gegenüber der Ausrichtung der Stempel. Ein Stempelversatz führt wie in Bild 10 a) zu einer Z-förmigen Probengeometrie.
- Die gemessene Kraft enthält einen nicht genau definierten Anteil für die Umformung von Werkstoffvolumen seitlich der Stempel, was dem inneren Schiebungsanteil entspricht.

Darüber hinaus sind gleiche Reibbedingungen an beiden Seiten vorzusehen [132], andernfalls führen konstante, aber ungleiche Reibbedingungen auf Ober- und Unterseite zu einer u-förmigen Probengeometrie gemäß Bild 10 b) oder nicht konstante Reibung wie in Bild 10 c) wiederum zu einer Z-förmigen Geometrie. Wesentliche Einflussfaktoren auf die Ergebnisgüte sind einerseits die Reibung, welche eine ungleichmäßige Spannungsverteilung begünstigt und andererseits die Schiebung, die durch die Umlenkung des Werkstoffs an der scharfen Stempelkante auftritt. Daher sind in For-

mel (3) bei Verwendung der Pressenkraft sowohl Reibungs- als auch Schiebungsanteile vermengt, weshalb in der nicht korrigierten Form die korrekte Bezeichnung der Umformwiderstand k_w anstatt k_f ist [127]. Durch das Verhältnis von Stempelbreite und Probendicke a/h werden die Anteile von Reibung und Schiebung gegensätzlich beeinflusst. So reduziert sich der Reibungsanteil bei schmalen Stempeln, gleichzeitig nimmt dadurch der Schiebungsanteil zu. Umgekehrt verhält es sich für breite Stempel. Als Kompromiss wird ein Verhältnis $a/h = 1$ empfohlen [127].

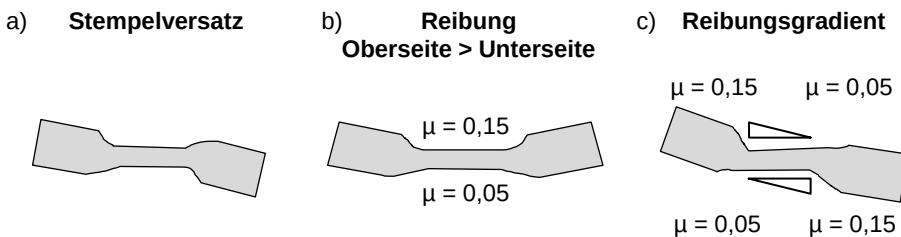


Bild 10: Auswirkungen durch a) Stempelversatz, b) unterschiedliche Reibung auf Ober- und Unterseite und c) ungleichmäßige Reibung nach [132]

Als Ansatz für die Verbesserung des Flachstauchversuchs wird von Becker et al. der Einsatz von Stempel mit abgerundeten Kanten vorgeschlagen, was im Zusammenhang mit einem Verhältnis $a/h = 2$ zu einer deutlichen Reduktion des Schiebungsanteils führt [127]. Dies ist jedoch damit verbunden, dass die wirksame Stempelbreite als Einflussfaktor in Abhängigkeit der Eindringtiefe bestimmt werden muss. Mit den genannten Voraussetzungen für kleine Schiebungsanteile geht allerdings ein erhöhter Reibungsanteil einher. Dieser muss wiederum für die Verbesserung der Ergebnislage rechnerisch eliminiert werden. Voraussetzung hierfür ist die experimentelle Bestimmung der Reibzahl. Als weiterer Einflussfaktor ist die Breitung der Probe aufgeführt. Im Randbereich tritt ein Stofffluss in y -Richtung auf, den Becker [133] mit der Fließscheidenhypothese von Preussler aus [134] erklärt. Um die Breitung in y -Richtung in der Auswertung zu berücksichtigen, nutzt Becker die Breitungsgleichung nach Geuze [38] für das Flachlängswalzen in der folgenden Form:

$$b = b_0 + BF \cdot (h_0 - h) \quad (5)$$

Der Breitungsfaktor BF ist beim Flachstauchversuch von der Stempelbreite abhängig. Für eine Stempelbreite $a = h_0$ wurde ein Wert $BF = 0,6 - 0,65$ ermittelt. Für breite Stempel $a = 2 h_0$ ist die Breitung deutlich größer mit Werten für $BF = 1,3 - 1,4$ [133]. Außerdem gibt es eine Abhängigkeit der Breitung durch die Probenlänge in x -Richtung. Ist diese nur etwas länger

als die Stempelbreite, fällt die Breitung stärker aus. Zusammengefasst kann festgestellt werden, je geringer die Probenlänge und -breite sind und je geringer die Reibzahl ist, desto größer sind die Breitung und die Abweichung von der ebenen Formänderung [133].

Experimentelle Untersuchungen von Becker [133] wurden an Proben mit einer Dicke von 6 mm durchgeführt. Hingegen haben van Putten et al. [135] gezielt die Skalierung von Flachstauchversuche eingesetzt, um Größeneffekte, also Eigenschaftsabweichung, welche nicht mit den geometrischen Abmessungen skalieren, an hochreinem Kupfer Cu-OF zu analysieren. Hierbei wurden Blechdicken im Bereich 0,5 mm bis 4 mm untersucht. Es wurde nachgewiesen, dass der Flachstauchversuch mit vollständiger Ähnlichkeit skaliert werden kann. Und vom Gefüge abhängige Effekte wie die Hall-Petch-Beziehung, dass sich mit kleinerem Korndurchmesser d_k die Fließspannung erhöht, bei konstanter Probendicke erfasst werden können. Die Verkleinerung der Blechdicke bei gleicher Korngröße führt ebenfalls zu einer Reduzierung der Fließspannung, allerdings wird dies auf den höheren Anteilen an freien Oberflächenkörnern dem sogenannten Rand-schichtanteil zurückgeführt [136]. Ein Übergang vom makroskopischen Verhalten wurde für Cu-OF für ein Verhältnis von Korngröße und Probendicke $d_k/h_o = 0,0125$ und größer identifiziert. Der Einfluss von Korngröße und Probendicke wurde experimentell und numerisch auf Basis der kristallplastischen Simulation durchgeführt [137]. Hierfür wurde jedoch nicht der Versuch skaliert, sondern mittels Wärmebehandlung eine mittlere Korngröße von $d_k = 690 \mu\text{m}$ eingestellt, was bei einer Probendicke von 4 mm eine durchschnittliche Anzahl 7 - 10 Körner über die Dicke bedeutet. Um die Simulationsergebnisse mit dem Experimente abzugleichen, wurde der Untersuchungsansatz von Rietman [138] genutzt. Dieser sieht Flachstauchproben vor, die in der Probenmitte geteilt sind und mit Schrauben während des Versuchs zusammengehalten werden. Dadurch ist nach dem Versuch die Analyse der ebenen Formänderung in der Probenmitte möglich. Der Vergleich der Ergebnisse der kontinuumsmechanischen und kristallplastischen Simulation zeigen Unterschiede. Obwohl in der kristallplastischen Simulation auch das für den Flachstauchversuch typischen Ausbildung eines Schmiedekreuzes erkennbar ist, so ist aufgrund der geringen Anzahl an Körnern in der Umformzone eine ungleichmäßige Verformung der einzelnen Körner festzustellen [137]. Daraus kann im Umkehrschluss gefolgert werden, dass eine geringe Korngröße bzw. eine große Anzahl an Körnern in der Umformzone die Voraussetzung für die kontinuumsmechanische Betrachtung des Umformprozesses sind.

2.5 Zusammenfassende Bewertung des Stands der Technik und Forschung

Die Elektroindustrie ist aktuell durch die wachsenden Anteile der Automobilindustrie sowie des Industriebereichs als Abnehmer von elektronischen Systemen geprägt. Ein wichtiger Bestandteil dieser Systeme sind Kunststoff-Metall-Hybridkomponenten, z. B. als Steckkontakte. Da solche Systeme oftmals an exponierten Stellen verbaut sind, sind sie widrigen Umwelteinflüssen, wie Staub, hohe Temperaturen, Vibrationen und Feuchtigkeit ausgesetzt. Gerade der Aspekt der Dichtheit stellt eine zentrale Anforderung für den fehlerfreien Betrieb elektronischer Systeme dar. Die typische und sehr effiziente Prozesskette für die Herstellung von Kunststoff-Metall-Hybridbauteile ist das Umspritzen metallischer Einleger im Montagespritzguss. Herausforderungen sind dabei die chemische Inkompatibilität sowie die unterschiedlichen Eigenschaften von Kunststoff und Metall. So können mittels Umspritzen Verbunde mit guter Festigkeit erzeugt werden, insbesondere durch ein Aufrauen oder Strukturieren der Einleger. Jedoch korreliert eine erhöhte Verbundfestigkeit nicht unmittelbar mit einer Verbesserung der Dichtheit. Anhand von Untersuchungen wurde grundsätzlich nachgewiesen, dass die Dichtheit durch eine Erhöhung der Verbundhaftung oder auch durch die Laserstrukturierung mit Quernuten, die als Barriere wirken, verbessert werden kann. Jedoch ist die Laserstrukturierung sowohl zeit- als auch kostenintensiv und daher nur bedingt für die Serienfertigung geeignet.

Die typische Prozesskette für die Herstellung von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen besteht aus der Fertigung der metallischen Einleger, welche sehr effizient in hoher Stückzahl mittels eines Folgeverbundprozesses erzeugt werden können. Neben Schneidoperationen können auch Umformoperationen wie das Prägen für die Erzeugung von Quernuten integriert werden, was hohes Potential für die effiziente Strukturierung bietet. Da die resultierenden Eigenschaften von mediendichten Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen durch die gesamte Prozesskette beeinflusst werden, ist eine grundlegende Analyse der einzelnen Prozessschritte notwendig. Der Schwerpunkt bisheriger Untersuchungen lag vorrangig auf der kunststofftechnischen Verarbeitung. Es sind keine systematischen Untersuchungen zur umformtechnischen Einlegerfertigung aus dem Stand der Technik bekannt.

Zu den Einzelprozessen wurden grundlegende Untersuchungen durchgeführt. Gerade die Untersuchungen zum Scherschneiden sind Gegenstand vieler wissenschaftlichen Arbeiten und grundlegende Erkenntnisse sind fester Bestandteil von Fach- und Lehrbüchern. Daher ist auch bekannt, dass der Schneidprozess sowohl die Schnittkanten geometrie als auch die mechanischen Eigenschaften der Schnittkante verändert. Dies ist insbesondere bei der Untersuchung von Folgeverbundprozessen zu berücksichtigen, da es zu Wechselwirkungen bei der Umformung der Schnittkanten führen kann.

Obwohl das Prägen insbesondere bei der Münzherstellung seit dem Altertum eine in der Praxis etablierte Technik ist, findet sich eine schwerpunktmäßige wissenschaftliche Behandlung erst Ende der 1990er und anschließend im Zusammenhang mit dem Forschungsschwerpunkt der Mikroumformtechnik. Da sich das Prägen an sich im Grenzbereich zur Mikroumformung befindet, wurden daher die Ursachen bereits bekannter Phänomene untersucht. In den bisherigen Arbeiten ist überwiegend das Füllen von Kavitäten Gegenstand. Dies umfasst sowohl Umformprozesse im geschlossenen Gesenk als auch offene Prägeprozesse, welche einen lateralen Werkstofffluss erlauben. Zielgröße ist dabei vorrangig die Formfüllung und deren Einflussgrößen. Der Prozess des Einprägens wurde bisher nicht explizit behandelt. An dieser Stelle kann auf die Untersuchungen zum Flachstauchversuch verwiesen werden, welcher eine Ähnlichkeit zum Einprägen von Quernuten bei flachen Einlegern aufweist. Jedoch werden hierbei nur vereinfachte Rahmenbedingungen angenommen und der technische Kontext und die Wechselwirkungen mehrerer eingepprägter Strukturen nicht berücksichtigt. Darüber hinaus ist die Untersuchung der Ausformung der Randbereiche und der Kanten geometrie nicht Gegenstand bisheriger Arbeiten. Die genaue Kenntnis der Ausformung ist im Hinblick die finalen Dichttheitseigenschaften von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen von großer Bedeutung.

In Bezug auf die Prozesskette für die Herstellung von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen werden die Eigenschaften des Fertigteils wesentlich durch die Teilprozessschritte beeinflusst. Daher ist die systematische Untersuchung der Einlegerherstellung mittels Folgeverbundprozessen im Kontext Gesamtprozesskette ein zentraler Schritt, um das Prozessverständnis zu verbessern. Es besteht somit der Bedarf, die Erkenntnisse aus dem Bereich Scherschneiden und Prägen zusammenzuführen und sowohl die Einflüsse der Einzelprozesse als auch deren Wechselwirkungen und Mechanismen vor dem Hintergrund der nachgelagerten kunststofftechnischen Verarbeitung zu verstehen.

3 Zielsetzung und methodische Vorgehensweise

Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ist es, Verständnis für die Herstellbarkeit strukturierter Einleger für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile in einem Folgeverbundprozess aufzubauen. Hierbei sollen im Spannungsfeld zwischen den technologischen Bauteilanforderungen und den fertigungstechnischen Möglichkeiten Wirkmechanismen und Prozessgrenzen identifiziert werden. Das Strukturieren von Einlegern hat großes Potential hinsichtlich der Verbesserung der Dichtheit von Kunststoff-Metallverbindungen, welche beispielsweise für Steckverbindungen benötigt werden. Trotz der hohen Bedeutung für die Industrie gibt es bisher allerdings kaum wissenschaftliche Untersuchungen, welche sich der anspruchsvollen und komplexen Prozesskette zur Herstellung strukturierter Einleger unter der Berücksichtigung des nachfolgenden Montagespritzgießprozesses widmet. Insbesondere die Zusammenhänge der einzelnen Prozessstufen aus Scherschneiden, Kantenprägen und Oberflächenstrukturieren mittels Prägen und deren gegenseitige Beeinflussung sind bisher unbekannt. Daher wird im Rahmen der grundlagenwissenschaftlichen Analysen das übergeordnete Ziel verfolgt, Wissen für die anforderungsgerechte Fertigung zu erarbeiten. Voraussetzung für die experimentellen Untersuchungen bildet die Auslegung eines mehrstufigen Folgeverbundprozesses bestehend aus Scherschneiden, Kantenprägen und Nutenprägen und dem zugehörigen Werkzeugkonzept. Mit diesem Versuchsstand sollen anschließend sowohl die wesentlichen Einflussfaktoren auf die resultierende Strukturgeometrie identifiziert als auch deren Beeinflussbarkeit entsprechend den Anforderungen hinsichtlich der kunststofftechnischen Weiterverarbeitung für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile evaluiert werden.

Für die Untersuchungen wird ein kombiniert simulativ-experimenteller Ansatz verwendet. Dabei werden die simulativen Analysen auf Basis der Finite-Elemente-Methode genutzt, um das Prozessverständnis hinsichtlich der vorherrschenden Spannungen und des resultierenden Stoffflusses zu steigern.

Die Arbeit gliedert sich in vier Stufen entsprechend der Abfolge der Prozesskette. Im Rahmen der ersten Stufe werden die Grundlagen für den Folgeverbundprozess gelegt. Dafür erfolgen die Erarbeitung eines mehrstufigen Prozesses sowie die wissenschaftliche Konzipierung eines mehrstufigen

gen modularen Folgeverbundwerkzeugs. Dabei werden einerseits Erkenntnisse aus dem Schneidprozess durch die Analyse der Schnittkanteneigenschaften für die nachfolgenden Prozesse erarbeitet. Andererseits werden die kritischen Werkzeugbelastungen im Prägeprozess quantifiziert, deren Ursachen identifiziert und in der finalen Prozessauslegung berücksichtigt.

Aufbauend auf den Ergebnissen wird in der zweiten Stufe das umformtechnische Kantenverrunden mittels Prägen analysiert. Wichtig ist in diesem Zusammenhang, insbesondere ein ganzheitliches Verständnis der signifikanten Prozessparameter aufzubauen und deren Auswirkungen auf die Formfüllung zu quantifizieren. Schwerpunkte der Untersuchungen bilden dabei die Bewertung sowohl der Maßtoleranzen der Einleger als auch die Analyse der Wechselwirkungen mit dem Scherschneidprozess. Des Weiteren werden Ansätze zur Reduktion der Prozesssensitivität gegenüber den Maßtoleranzen aufgezeigt.

In der dritten Stufe erfolgt eine grundlegende Analyse der Oberflächenstrukturierung der metallischen Einleger mittels Prägen. Durch eine separierte Analyse des axialen und lateralen Werkstoffflusses können grundlegende Wirkzusammenhänge identifiziert und deren Auswirkungen auf die resultierende Nutgeometrie quantifiziert werden. Zusätzlich erfolgt eine Analyse der Abbildungsgenauigkeit der Nutgeometrie. Dabei soll insbesondere die Flankenwinkelabweichung zwischen Stempel und der umgeformten Nut als zentrale Bewertungscharakteristikum herangezogen werden. Die Erkenntnisse werden ebenfalls genutzt, um die resultierenden Prozesskräfte zu erklären. Abschließend wird ein Prozessfenster für die Strukturierung metallischer Einleger abgeleitet.

In der letzten Stufe werden die Auswirkungen der umformtechnischen Strukturierung von Einlegern auf die resultierenden Dichtheitseigenschaften von Kunststoff-Metall-Hybridbauteile dargelegt. Hierbei wird anhand von Leckageprüfungen die Wechselwirkung des Herstellungsprozesses der metallischen Einleger und der resultierenden Bauteileigenschaften aufgezeigt.

Zusammenfassend wird im Rahmen der Arbeit grundlegendes Wissen hinsichtlich der maßgeschneiderten Herstellung strukturierter Einlegern erarbeitet. Mit den in dieser Dissertation erarbeiteten Erkenntnissen wird es zukünftig möglich sein, die Dichtheit von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen zu steigern.

4 Versuchseinrichtungen, Werkstoffe, Prüfverfahren und Methoden

Im folgenden Kapitel werden die verwendeten Anlagen und Versuchseinrichtungen sowie die Werkstoffe, welche im Zusammenhang mit den Untersuchungen verwendet werden, beschrieben. Darüber hinaus werden die Mess- und Auswertemethoden erläutert. Aufgrund der Vielzahl an Anlagen und Geräte soll nur auf deren wesentlichen Eigenschaften eingegangen werden. Des Weiteren wird die verwendete Probengeometrie, welche die Schnittstelle zwischen der umform- und kunststofftechnischen Verarbeitung bildet, hinsichtlich der technischen Anforderungen und der resultierenden Funktionselemente beschrieben.

4.1 Versuchseinrichtungen

Die eingesetzten Versuchseinrichtungen umfassen Anlagen zum Aufbringen von Kräften. Dies wurden beim Scherschneiden und Prägen der Proben sowie zum Prüfen der resultierenden mechanischen Eigenschaften der Proben eingesetzt. Darüber hinaus finden diese auch Anwendung bei der Werkstoffcharakterisierung. In dem Zusammenhang wurde teilweise auch optische Dehnungsmesstechnik eingesetzt, um erweiterte Erkenntnisse abzuleiten.

4.1.1 Universalprüfmaschinen

Mit einer elektromechanischen Universalprüfmaschine RM 400 der Firma Schenck-Trebel wurden Scherschneid und Prägeversuche durchgeführt. Diese hat eine Maximalkraft von 400 kN und eine maximalen Verfahrensgeschwindigkeit von 300 mm/min und ist mit einer Steuerung der Firma ZwickRoell GmbH & Co. KG und deren Software testXpert II ausgestattet. Der Grundaufbau der Maschine basiert auf einem O-Gestell, welches in einer Vier-Säulen-Bauweise umgesetzt ist, und wird mit zwei über ein Zykloidgetriebe synchronisierte Spindeln mechanisch angetrieben. Der Verfahrensweg der Presse wird mit einem inkrementellen Wegaufnehmer erfasst, der die Drehposition detektiert. Da die Wegerfassung indirekt erfolgt, beinhalten die Daten auch die elastische Verformung der Maschine. Dies kann durch die Steuerung auf Basis der Steifigkeitskennlinie der Prüfmaschine inklusive des Prüfaufbaus kompensiert werden, so dass im lagegere-

gelten Modus eine sehr genaue Positionierung möglich ist. Die Kraftmessung erfolgt durch die Montageposition auf der Traverse direkt im Kraftfluss, wodurch eine unverfälschte Erfassung der Prozesskräfte gewährleistet ist.

Im Rahmen der Werkstoffcharakterisierung wurden Schichtstauchversuche mit der Universalprüfmaschine LFEM 300 der Firma Walter+Bai AG durchgeführt. Die Anlage ist hinsichtlich des Aufbaus und der Funktionalität vergleichbar mit der zuvor beschriebenen Prüfmaschine der Firma Schenck-Trebel. Die Maximalkraft der Anlage liegt bei 300 kN und die maximale Verfahrgeschwindigkeit beträgt 500 mm/min. Die Anlage ist in gleicher Weise mit einer Steuerung der Firma ZwickRoell GmbH & Co. KG nachgerüstet.

4.1.2 Schnellläuferpresse

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte modulare Folgeverbundwerkzeug wurde auf einer Schnellläuferpresse vom Typ BSTA 510-125 der Firma Bruderer AG betrieben. Es handelt sich um eine mechanische Hochleistungspressen mit einer Nennkraft von 510 kN und einer halbautomatischen Hubverstellung von 19 mm bis 64 mm [139]. Das spezielle Hebelsystem sorgt für eine gleichmäßige Lastverteilung und in Kombination mit dem Massenausgleich wird dadurch eine hohe Präzision der Presse für Hubfrequenzen im Bereich von 100 – 950 Hub/min erreicht. Darüber hinaus ist die Presse mit einer automatischen Stößelverstellung ausgestattet, was die Anpassung des unteren Totpunkts im laufenden Betrieb ermöglicht, womit durch Trägheitskräfte bedingte Veränderung der Eindringtiefe von Stempeln z. B. beim Prägen oder Durchsetzen in Abhängigkeit der Hubzahl kompensiert werden können. Teil der Anlage ist ein Servovorschubapparat BSV 170 der Firma Bruderer AG. Es handelt sich um einen hochdynamischen Walzenvorschub, der frei eingestellt werden kann und der winkelsynchron über die Pressensteuerung angesteuert wird. Dieser kann für Bänder bis 2 mm Dicke und 170 mm Breite eingesetzt werden. Darüber hinaus sind eine Richtmaschine des Typs ARKU RM 1825.4 und eine Haspel des Typs ARKU AH 500/120/ST-M der Firma ARKU Maschinenbau GmbH Bestandteil der Gesamtanlage. Die Richtmaschine besteht aus einem oberen und unteren Walzenstuhl, in welchen 19 Richtwalzen mit einem Durchmesser von 18 mm verbaut sind. Es kann Bandmaterial mit einer Blechdicke von 0,2 – 4,0 mm und bis zu 250 mm Breite gerichtet werden und die maximale Durchlaufgeschwindigkeit liegt bei 60 m/min. Über vier Stellräder kann der obere Walzenstuhl geneigt werden, um die Coilkrümmung zu

richten. Zusätzlich kann dieser auch über die Längsachse verkippt werden, um eine Säbelbildung auszugleichen. Der Richtanlage vorgelagert ist die Haspel mit einer Tragfähigkeit von 500 kg. Diese ist für Bandbreiten von 10 -120 mm und einen maximalen Coildurchmesser von 1200 mm ausgelegt und hat einen Spreitzbereich von 370 -530 mm für den Coilinnendurchmesser. Aus den Spezifikationen der einzelnen Anlagenteile folgen als Grenzwerte für die Gesamtanlage eine verarbeitbare maximale Blechdicke von 2 mm und einer maximalen Bandbreite von 120 mm.

4.2 Versuchswerkzeuge

Nachfolgend werden die Werkzeuge vorgestellt, welche am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie verfügbar sind und im Rahmen der Untersuchungen eingesetzt wurden. Diese wurden in ihrer Hauptfunktion unverändert verwendet und wurden teilweise nur an die Probengeometrie mit Anschlägen und Einlegehilfen angepasst.

4.2.1 Prägewerkzeug

Für die Durchführung von Prägeversuchen wird ein Werkzeugaufbau auf Basis eines Säulenführungsgestells mit vier Säulen verwendet. Dadurch wird eine exakte Ausrichtung der Stempel sichergestellt und ein mögliches Verkippen unterbunden. Wie in Bild 11 dargestellt, werden Kugelführungen eingesetzt, wodurch eine hohe Führungsgenauigkeit des Aufbaus bei gleichzeitig geringem Reibungswiderstand erreicht wird. Das Werkzeug ist für den Betrieb in der Prüfmaschine Schenck-Trebel RM 400 ausgelegt.

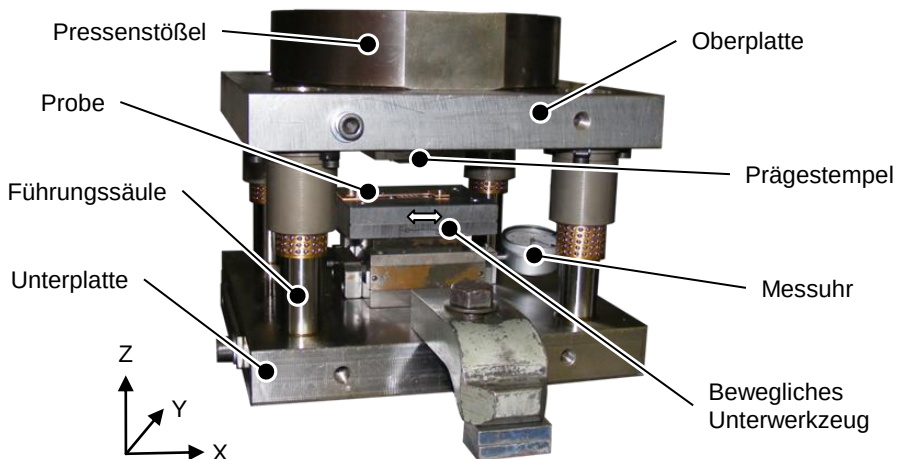


Bild 11: Prägewerkzeug im eingebauten Zustand mit eingelegter Probe

Das Werkzeug ist modular konzipiert, so dass standardisierte Prägestempel, in welche individuelle Prägegeometrien eingebracht werden, einfach ausgetauscht werden können. Die Prägestempel gemäß Bild 12 werden aus vorkonfektionierten Rohlingen gefertigt. Diese sind aus einem pulvermetallurgisch hergestellten Schnellarbeitsstahl 1.3343. Die Stempelrohlinge sind spanend bearbeitet, gehärtet und abschließen auf allen sechs Seiten geschliffen. Daher muss lediglich die Stempeloberseite bearbeitet werden, um Prägestrukturen zu erzeugen. Die Prägegeometrie wurde mittels Drahterodieren (WEDM) erzeugt. Dies ist vorteilhaft, da der Rohling bereits auf 62 HRC gehärtet ist und die Bearbeitung beim Erodieren unabhängig von der Härte und kraftfrei erfolgt. Letzteres ist relevant für die hohe Bearbeitungsgenauigkeit beim Erodieren insbesondere bei der Herstellung dünner Rippen. Hierfür wurde eine Drahterodieranlage Cut 2000 der Firma GF AgieCharmilles eingesetzt mit deionisiertem Wasser als Dielektrikum. Die Stempelflächen, welche Kontakt mit dem Werkstück haben, wurden vollständig mittels Erodieren bearbeitet. Dadurch wurde sowohl eine geringe Oberflächenrauheit mit $R_a = 0,091 \mu\text{m}$ und $R_z = 0,932 \mu\text{m}$ als auch eine gleichmäßige stochastische Oberflächenstruktur ohne Vorzugsrichtung erreicht.

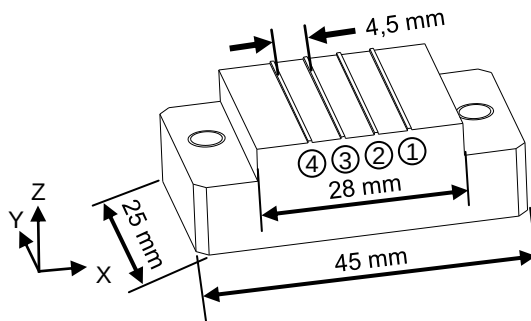


Bild 12: Prägestempel mit Abmaßen

Die Positionierung der Prägestempel erfolgt über die geschliffenen Seitenflächen in entsprechende Taschen. Um eine eindeutige Ausrichtung sicherzustellen, ist eine der beiden Befestigungsbohrungen außermittig versetzt und dient als Verdrehsicherung. Das Unterwerkzeug kann axial in x-Richtung mittels einer Stellschraube relativ zum Oberwerkzeug verschoben werden. Dadurch ist es möglich, die Position der beiden Prägestempel zueinander zu justieren oder aktiv einen Versatz der beiden Stempel herbeizuführen. Mittels der angebrachten Messuhr erfolgt die Kontrolle der Positionierung. Die Proben wurden mittels zweier Zentrierstifte in der

Ebene fixiert. Durch die Bohrung werden die beiden translatorischen Freiheitsgrade und durch das Langloch der rotatorische Freiheitsgrad in der Ebene eingeschränkt. Gleichzeitig wird durch das Langloch der Toleranzausgleich durch das Längen der geprägten Probe ermöglicht.

4.2.2 Lochwerkzeug

Um den Einfluss unterschiedlicher Schneidspalte auf die Schnittkantenqualität zu bewerten, wurde ein vorhandenes Scherschneidwerkzeug zum Lochen eingesetzt. Der Aufbau besteht aus einem Säulenführungsgestell mit vier stehenden Führungssäulen und Kugelführungen, um hohe Führungsgenauigkeit sicherzustellen und Reibungseinflüsse gering zu halten. Das Werkzeug hat einen runden Schneidstempel mit einem Nenndurchmesser von 10 mm und über austauschbare Standardschneidbuchsen können unterschiedliche Schneidspalte eingestellt werden. Mittels eines gefederten Niederhalters werden die Proben während des Schneidvorgangs fixiert. Um den Niederhalterdruck konstant zu halten, wurden quadratische Proben mit einer Abmessung von 45 mm x 45 mm verwendet, welche über eine Schablone geringerer Blechdicke zentriert wurden. Das Werkzeug kann sowohl in der Universalprüfmaschine RM 400 als auch auf der Schnellläuferpresse der Firma Bruderer im Einzelhubbetrieb eingesetzt werden.

4.3 Werkstoffe

Bei Leiterwerkstoffen wird eine hohe elektrische Leitfähigkeit verlangt. Neben Silber gehören Kupfer und Aluminium zu den Werkstoffen mit der höchsten Leitfähigkeit [140]. Vor dem Hintergrund des Leichtbaus ist das Verhältnis aus elektrischer Leitfähigkeit und relativer Dichte eine relevante Größe. Daher wurde sowohl eine typische Kupfer- als auch eine Aluminiumlegierung mit geringerer Dichte für die Untersuchungen ausgewählt. Darüber hinaus bestehen für die beiden Werkstoffklassen unterschiedliche normierte Spezifikationen, was sich in verschiedenen Grenzabmaßen für die Blechdicke äußert und im Zusammenhang enger Toleranzvorgaben zu berücksichtigen ist.

4.3.1 Naturharte Aluminiumlegierung AlMg₃

Aluminium ist neben Stahl das wichtigste Gebrauchsmetall. Das Hauptanwendungsgebiet stellt das Transportwesen dar, darunter vor allem der

Automobil- und Flugzeugbau. Aufgrund seiner guten elektrischen Leitfähigkeit und gleichzeitig niedrigen Dichte ($2,71 \text{ g/cm}^3$) ist Aluminium auch ein interessanter Werkstoff für den Einsatz in elektrischen Systemen. Im Vergleich zu Kupfer ($8,93 \text{ g/cm}^3$) kann mit Aluminium die spezifische Leitfähigkeit einer Kupferlegierung bei nur etwa 48 % des Gewichts erreicht werden [141]. Darüber hinaus ist Aluminium kostengünstiger als Kupfer, was die Bestrebungen zur Nutzung von Aluminium als Substitut unterstützt. Für die Untersuchungen wurde eine Aluminiumknetlegierung der 5000er-Serie AlMg3 (EN AW 5754) eingesetzt, welche in einem niedrigen bis mittleren Festigkeitsniveau liegt. Legierungen der 5000er-Serie sind in der Regel nicht aushärtbar und werden daher als naturhart bezeichnet [142]. Des Weiteren ist AlMg3 sehr gut zur Herstellung von Feinschneidteilen geeignet [37]. Für AlMg3 ergibt sich somit eine vorteilhafte Eigenschaftskombination sowohl für die Produktion metallischer Einleger als auch für den Einsatz in elektrischen Komponenten unter widrigen Einsatzbedingungen.

Der Werkstoff AlMg3 (EN AW 5754) wurde im Zustand H22 (1/4 hart) als Coil mit einer Nennblechdicke von 1 mm und einer Nennbreite von 100 mm von der Firma Haecker KG, Pforzheim, bezogen. Der Werkstoff wurde kaltgewalzt und rückgeglüht. Die chemische Zusammensetzung entsprechend der Normvorgabe und der Prüfbescheinigung des Herstellers sind in Tabelle 1 gelistet.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der Legierung AlMg3 gemäß DIN EN 573-3 [143] und gemäß der Prüfbescheinigung des Herstellers. Angaben als maximaler Massenanteil in Prozent.

AlMg3	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
DIN	0,4	0,4	0,1	0,5	2,6 - 3,6	0,3	0,2	0,15
Ist	0,120	0,340	0,030	0,239	2,968	0,047	0,030	0,021

Gemäß der Lieferspezifikation nach DIN EN 485-4 [144] hat der Werkstoff eine Dickentoleranz von $\pm 0,04 \text{ mm}$. Eine Breitentoleranz des Spaltbands von $+ 0,20 \text{ mm}$ wurde in Abstimmung mit dem Lieferanten vereinbart. Die mechanischen Eigenschaften aus dem Zugversuch nach Norm und gemäß der Prüfbescheinigung für den Zustand H22 sind in Tabelle 2 aufgeführt. Im Rahmen der Untersuchungen wurde für die elastischen Eigenschaften ein Elastizitätsmodul von 70 GPa angenommen [142].

Tabelle 2: Mechanische Eigenschaften der Legierung AlMg₃ gemäß DIN EN 485-2 [145] und gemäß der Prüfbescheinigung des Herstellers

AlMg ₃ EN AW-5754 H22	R _m in N/mm ²	R _{p0,2} in N/mm ²	A ₅₀ in %
	min. - max.	min.	min.
DIN	220 - 270	130	8
Ist	235,4	130	25

4.3.2 Bronzelegierung CuSn6

Kupfer zeichnet sich durch eine hohe elektrische Leitfähigkeit aus, welche nahezu der von Silber entspricht, was als die hervorstechendste Eigenschaft von Kupfer gewertet werden [141]. Darüber hinaus sind die hohe thermische Leitfähigkeit, die gute Korrosionsbeständigkeit und die sehr gute Umformbarkeit charakteristisch für Kupferwerkstoffe [141]. Mit diesem Eigenschaftsprofil ist Kupfer sehr gut für den Einsatz in der Elektrotechnik geeignet. Daher werden etwa 60-70 % der Kupferproduktion in diesem Bereich eingesetzt [146]. Kupfer hat eine Dichte von ca. 8,93 g/cm³ und ist im Vergleich zu Aluminium deutlich teurer, woraus Bestrebungen zur Substitution erwachsen [146]. Kupfer in seiner Reinform weist eine geringe Festigkeit auf. Durch die Legierung von Kupfer können jedoch gezielt die mechanischen Eigenschaften verändert und wesentlich höhere Festigkeiten erreicht werden. Im Rahmen der Untersuchungen wurde die Legierung CuSn6 (CW452K) verwendet, welche aufgrund des Zinnanteils (Sn) der Gruppe der Bronzen zu zuordnen ist. Der Werkstoff hat eine kfz-Gitterstruktur, was sich vorteilhaft auf die Umformeigenschaften auswirkt. Darüber hinaus bewirkt die Zulegierung von Zinn bis etwa 6 % eine deutliche Festigkeitssteigerung bei gleichzeitig guter Zähigkeit im Vergleich zu reinem Kupfer [147]. Aufgrund der hohen Kaltverfestigung von Kupfer-Zinn-Legierungen hat der Werkstoff sehr gute Federeigenschaften und wird häufig zur Herstellung von stromleitenden Federn in Relais und in Teilen für Steckverbinder eingesetzt [147].

Der verwendete Werkstoff CuSn6 im Zustand F41 wurde von der Firma Gebr. Kemper GmbH + Co. KG, Olpe, bezogen. Es handelt sich um gewalztes Feinband. Die Normbezeichnung lautet CW452K R420, wobei der Zustand R420 eine Mindestzugfestigkeit $R_m = 420 \text{ N/mm}^2$ ausweist. Das Bandmaterial hat eine Nenndicke von 1 mm und eine Nennbreite von

100 mm. Der Vergleich der chemischen Zusammensetzung nach der Norm DIN EN 1654 [148] und der Prüfbescheinigung des Herstellers findet sich in Tabelle 3.

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung der Legierung CuSn6 gemäß DIN EN 1654 [148] und gemäß der Prüfbescheinigung des Herstellers. Angaben als maximaler Massenanteil in Prozent

CuSn6	Fe	Ni	P	Pb	Sn	Zn
DIN	0,1	0,2	0,01 -0,40	0,02	5,5-7,0	0,2
Ist	0,001	0,012	0,102	0,002	5,89	0,005

Der Werkstoff hat eine Dickentoleranz von $\pm 0,03$ mm gemäß DIN EN 1654 [148] und ist somit enger toleriert als die Aluminiumlegierung. Es handelt sich um Spaltband mit einer Nennbreite von 100 mm und einer Toleranz von $+ 0,20$ mm gemäß der Lieferspezifikation. Die mechanischen Kennwerte nach Norm und nach dem Prüfzeugnis des Lieferanten sind in Tabelle 4 gegenübergestellt. Es wurde für die Untersuchungen ein Elastizitätsmodul von 102 GPa [149] angenommen.

Tabelle 4: Mechanische Eigenschaften der Legierung CuSn6 [148]

CuSn6 F41 (CW₄₅₂K R₄₂₀)	R_m in N/mm²	R_{p0,2} in N/mm²	A₅₀ in %
	min. - max.	min.	min.
DIN	420 - 520	260	20
Ist	454 - 455	360 - 370	35

4.3.3 Werkstoffcharakterisierung

Als Eingangsdaten der Materialmodelle für die Umformsimulation wurden Fließkurven auf Basis von Schichtstauchversuchen verwendet. Aufgrund der beim Prägen dominierenden Druckbelastung und dem vergleichbaren hydrostatischen Spannungszustand wurde dieser Versuch ausgewählt in Anlehnung an [110]. Der Schichtstauchversuch orientiert sich am Druckversuch nach DIN 50106 [150]. Im Gegensatz zur Norm werden einzelne Blechrenden so übereinandergestapelt, dass diese einer zylindrischen Vollprobe entsprechen. Dadurch ist es möglich, Blechhalbzeuge unter Druckbelastung zu charakterisieren. Durch die Charakterisierung der Werkstoffcharge, welche für die experimentellen Untersuchungen eingesetzt

werden, wird die Grundlage eine gute Übertragbarkeit der Simulationsergebnisse geschaffen. Für die Versuche wurden laserstrahlgeschnittene Blechronden mit einem Durchmesser von 15 mm verwendet. Die Ronden wurden mit gleichgerichteter Walzrichtung gestapelt und es wurde ein 1:1-Verhältnis für Durchmesser und Stapelhöhe angestrebt, was bei einer Blechdicke von 1 mm einem Stapel von 15 Ronden entspricht. Die Proben wurden über eine Schablone zentriert, um die Krafteinleitung in der Wirklinie der Universalprüfmaschine LFEM 300 sicherzustellen. Entsprechend dem Vorgehen in [6] wurde, um den Reibungseinfluss zu minimieren, Teflonfolie zwischen dem Probenstapel und den gehärteten, polierten Stauchbahnen eingesetzt. Die Versuche erfolgten mit einer konstanten Traversengeschwindigkeit von 5 mm/min bei Raumtemperatur bis zu einem Umformgrad von $\varphi = 0,5$. Die Ableitung der Fließkurve basiert auf Kraft-Weg-Daten der Prüfmaschine. Daher wurde die elastische Auffederung der Maschine in Blindstauchversuchen ohne Probe ermittelt, um damit die Weg-Daten um elastischen Anteil der Maschine zu korrigieren. Die Fließkurven wurden um den elastischen Anteil des Werkstoffs korrigiert, so dass diese nur auf rein plastischer Dehnung beruhen.

Anhand der Versuchsergebnisse in [151] wurde für CuSn6 eine etwa dreifach höhere Dehngrenze $R_{p0,2} = 363 \text{ N/mm}^2$ im Vergleich zur Legierung AlMg3 mit $R_{p0,2} = 127 \text{ N/mm}^2$ ermittelt. Darüber hinaus wird das sehr unterschiedliche Verfestigungsverhalten der beiden Werkstoffe in Bild 13 deutlich. Während CuSn6 durch ein kontinuierliches Verfestigungsverhalten gekennzeichnet ist, kann bei AlMg3 zunächst eine starke Verfestigung bei geringen Umformgraden festgestellt werden, welche in einen stark abgeflachten Kurvenverlauf übergeht.

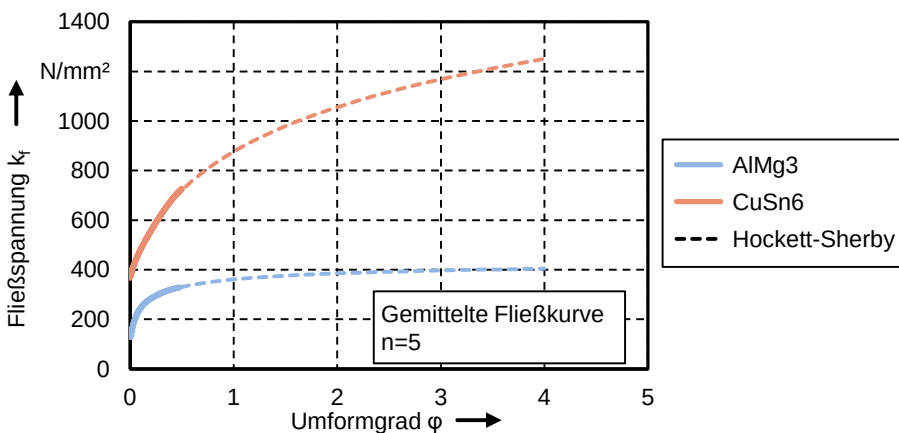


Bild 13: Im Schichtstauchversuch ermittelte Fließkurven und extrapolierte Fließkurven nach Hockett-Sherby

Da während des Prägeprozesses höhere Umformgrade auftreten, als im Schichtstauchversuch ermittelt werden können, wurde die Fließkurve auf Basis der experimentell ermittelten Stützstellen nach dem Ansatz von Hockett-Sherby [152] extrapoliert. Dieser ist für Aluminium gut geeignet, da es das Sättigungsverhalten der Verfestigung bei Aluminiumlegierungen besser beschreibt als andere Modelle [153]. Die Formulierung des Verfestigungsmodells nach Hockett-Sherby setzt sich folgendermaßen zusammen:

$$k_f(\varphi) = C_2 - (C_2 - C_1) \cdot e^{(-C_3 \cdot \varphi^{C_4})} \quad (6)$$

Die werkstoff- und versuchsspezifischen Modellparameter C_1 , C_2 , C_3 und C_4 werden so gewählt, dass die experimentelle Fließkurve approximiert wird. Hierfür wurde die Methode der kleinsten Fehlerquadrate eingesetzt. Die so ermittelten Parameter für die beiden Werkstoffe sind in Tabelle 5 gelistet.

Tabelle 5: Parameter des Verfestigungsmodells nach Hockett-Sherby für AlMg3 und CuSn6

Werkstoff	C_1 in N/mm ²	C_2 in N/mm ²	C_3	C_4
AlMg3	459,5878	127,0495	0,3516	-0,4729
CuSn6	3157,5163	385,6109	1,7272	-0,2913

Zur Bewertung des Gefüges und um mögliche Einflüsse auf den Prägeprozess einzuordnen, wurde die Korngröße in Abhängigkeit der Walzrichtung ermittelt [151]. Für die Ergebnisse in Bild 14 a) wurde das Linienschnittverfahren nach DIN 643 [154] angewandt.

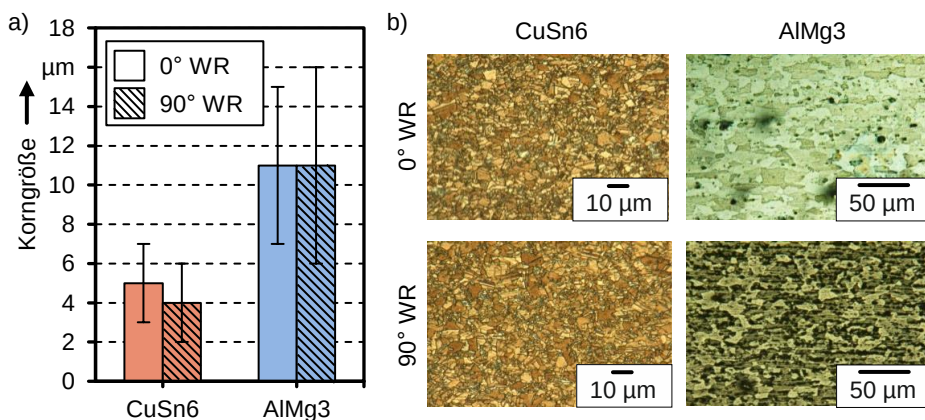


Bild 14: a) Korngröße und b) Gefügeaufnahmen der Versuchswerkstoffe

Wie in Bild 14 zu erkennen, liegt für den Werkstoff CuSn6 ein feinkörniges Gefüge vor, welches regellos verteilt ist. Die mittlere Korngröße beträgt etwa 5 μm und es sind keine Einflüsse der Walzrichtung erkennbar. Im Vergleich hierzu weist AlMg3 mit einer mittleren Korngröße von 11 μm ein gröberes Gefüge auf, welches gleichmäßig verteilt ist. Es ist ebenfalls kein spezifischer Einfluss der Orientierung der Walzrichtung feststellbar. Daher ist bezogen auf das Gefüge von einem isotropen Verhalten auszugehen.

4.4 Probekörper und Einlegergeometrie

Im Rahmen des DFG-Forschungsprojekts „Grundlagenuntersuchung zum Trennen, Umformen und Montagespritzguss und deren Interdependenz für die Herstellung beständig mediendichter elektronischer Systeme“ wurde eine Probekörpergeometrie entworfen, welche die essenzielle Schnittstelle zwischen der umform- und kunststofftechnischen Verarbeitung bildet. Die Probekörper wurden in Anlehnung an Flachstecker entworfen, welche typischerweise im Automobil in Steckern und Steuerungsmodulen als Anschlusskontakte Anwendung finden. Die Probekörpergeometrie wurde so konzipiert, dass diese den Anforderungen der beiden unterschiedlichen Fertigungsverfahren gerecht wird. Hierzu zählen die Möglichkeit der exakten Positionierung während des Folgeverbundprozesses und im Spritzgießwerkzeug, die Ausgleichsmöglichkeiten der Längung durch das Prägen und die thermische Ausdehnung sowie die Voraussetzung für die automatisierte Handhabung und Verarbeitung im Montagespritzguss. Gleichzeitig wurde der Probekörper als universelle Referenzgeometrie zur Prüfung und Bewertung unterschiedlicher Aspekte und Einflussfaktoren auf Dichtheit und Festigkeit entworfen. Daher wurde besonders auf die Kompatibilität der Probekörper mit unterschiedlichen Prüfverfahren zur Bestimmung der Dichtheit und der Auszugskräfte des Kunststoff-Metall-Verbundes geachtet. Gleichzeitig ist der Probekörper so angelegt, dass sich der Einleger und der Kunststoffanteil ausgehend von der Basisgeometrie variieren lassen.

In Bild 15 ist der Probekörper mit umspritzen Einleger dargestellt. Der Probekörper kann im Wesentlichen in vier Bereiche unterteilt werden. Dies umfasst den Anguss, den Kopfbereich mit Loch, den Untersuchungsbereich mit dem umspritzen Steg und abschließend den Fußbereich mit Langloch. Kopf- und Fußbereich bilden die Schnittstelle zur Werkzeug- und Prüftechnik, daher haben deren Merkmale einen rein funktionalen Charakter. Die Kombination aus Loch und Langloch dient zur exakten Positionierung und Ausrichtung. Diese ist für die Positionierung im Prägeprozess gedacht

und erfüllt auch in Kombination mit zwei werkzeugseitigen Haltestiften die Forderung einer gleichbleibenden Justage im Spritzgießwerkzeug [12]. Das Rundloch sperrt die zwei translatorischen Freiheitsgrade in der Ebene. Durch das Langloch wird der verbleibende rotatorische Freiheitsgrad gesperrt und gleichzeitig eine Überbestimmung des Systems vermieden. Was für das Einlegen und Aufschieben der Einleger auf die Haltestifte gut geeignet ist. Darüber hinaus erlaubt diese Anordnung die Dehnung des Einlegers in der Längsachse, um Zwangslagen und infolgedessen undefinierte Verformungen zu verhindern. Dies gilt sowohl für die Längung des Einlegers infolge der Prägeoperation als auch für die Wärmeausdehnung während des Umspritzprozesses. Dabei wird die Position durch das Loch im Kopfbereich als Referenzpunkt bestimmt. Die Flächen im Kopf- und Fußbereich sind ähnlich zu Flachzugproben als Spannfläche und in Kombination mit den Übergangsradien für die Krafteinleitung vorgesehen. Darüber hinaus sind die Seitenflächen als Angriffspunkte für die Handhabung mittels Parallelgreifer konzipiert. Den eigentlichen Untersuchungsbereich bildet der umspritzte Steg. Die Kunststoffkomponente kann hinsichtlich Umspritzlänge und Wandstärke variiert werden, wobei der Flansch stets gleich bleibt und die Funktion der Krafteinleitung bei Auszugversuchungen und als Dichtfläche bei der Leckageprüfung übernimmt.

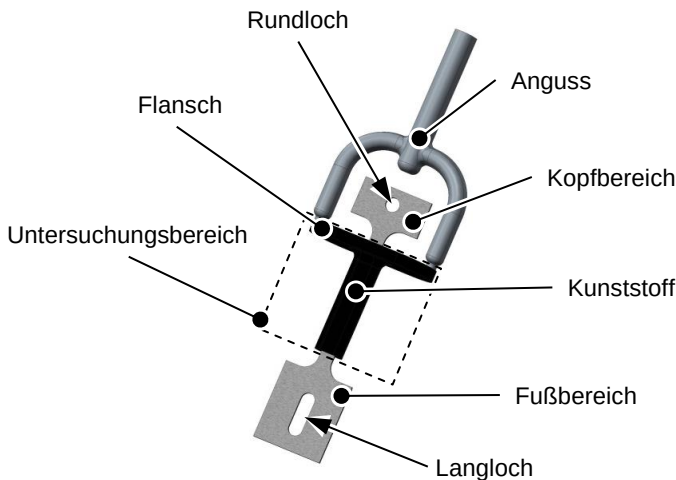


Bild 15: Probekörper bestehen aus metallischem Einleger und umspritzten Kunststoffteil inklusive des Angussystems

Die Nennmaße des metallischen Einlegers sind in Bild 16 dargestellt, eine ausführliche technische Zeichnung findet sich im Anhang. Als Referenzpunkt dient das Loch im Kopfbereich, weshalb sich die Bemaßungen davon

ableiten. Die Hauptabmessungen des Einlegers sind eine Breite von 25 mm und eine Länge von 100 mm. Während die Breite ein festes Funktionsmaß darstellt, kann die Länge ohne funktionale Auswirkungen leicht variiert werden. Dies wurde im Rahmen der Probenherstellung mittels Laserstrahlschneiden genutzt und die Proben fertigungsbedingt im Kopf- und Fußbereich gleichmäßig auf 96 mm verkürzt. Der Untersuchungsbereich ist durch den Steg gekennzeichnet, welcher 45 mm lang ist und eine Stegbreite $w = 5$ mm hat. In diesem Bereich erfolgt sowohl die Strukturierung als auch das Umspritzen. Um den Austritt von Kunststoff aus der Kavität des Spritzgießwerkzeuges zu vermeiden, erfolgt die Abdichtung dieser durch die in Bild 16 blau markierten Dichtbereiche. Diese müssen daher enge Toleranzvorgaben erfüllen. Folglich müssen Strukturierungsmaßnahmen so angelegt sein, dass diese Bereiche nicht beeinflusst werden. Die Einlegergeometrie mit einer Stegbreite $w = 5$ mm stellt die Basisvariante dar. Die Probengeometrie ist so konzipiert, dass sowohl eine Variation der Einlegergeometrie im Stegbereich als auch der Ausprägung der Kunststoffkomponente durch eine kostengünstige Werkzeuganpassung realisiert werden können.

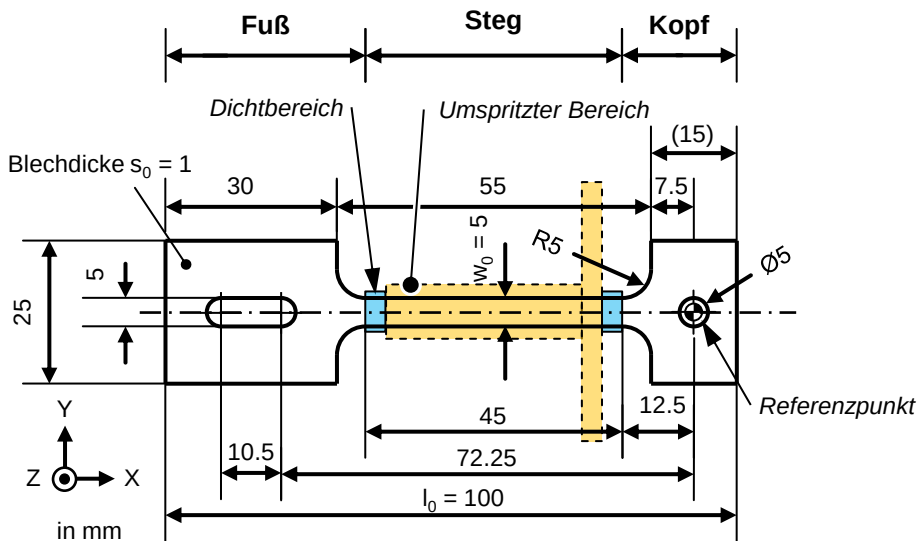


Bild 16: Einlegergeometrie mit Nennmaßen

Die Einleger wurden entsprechend der typischen Prozesskette elektronischer Komponenten mittels Scherschneiden hergestellt. Zusätzlich wurden auch Einleger laserstrahlschnitten. Diese dienen als Referenz mit rechteckigem Probenquerschnitt, um den Einfluss der Schnittkantengeometrie bei schergeschnittenen Proben zu bewerten. Hierfür wurde eine TruLaser

Cell 7020 mit CO₂-Laser der Firma TRUMPF GmbH & Co. KG eingesetzt, um Proben aus Aluminium zu schneiden. Für Proben aus CuSn6 wurde ein Nd:YAG-Laser eingesetzt.

4.5 Auswertemethoden

Die Methoden zur Auswertung der Versuche und Charakterisierung der Proben und der resultierenden Eigenschaften können in vier wesentliche Gruppen eingeteilt werden. Dies umfasst die Untersuchung der Makrogeometrie, was die Hauptabmessungen wie Länge und Breite beinhaltet, die Mikrogeometrie, mit den geometrischen Merkmalen der geprägten Strukturen und der Kanten geometrie, die Gefügeanalyse sowie die Analyse der lokalen mechanischen Eigenschaften mittels Mikrohärtemessungen.

4.5.1 Auswertung der Makrogeometrie

Für die effiziente Bestimmung der Gesamtlängung der Proben nach dem Prägen und der lokalen Breitung im Bereich der eingepprägten Nuten wurden Handmessmittel eingesetzt. Die Änderung dieser geometrischen Merkmale ist ein Indikator für die Analyse unterschiedlicher Einflüsse auf den Umformprozess. Durch den Einsatz hochpräziser Handmessmitteln in Verbindung mit einfachen Messvorrichtungen in Bild 17 kann eine ausreichend hohe Genauigkeit für die effiziente Erfassung der Merkmale erreicht werden. Dies wurde durch eine Messsystemanalyse nach [155] vom Typ 1 und Typ 2, was den Bedienereinfluss einschließt, nachgewiesen [156].

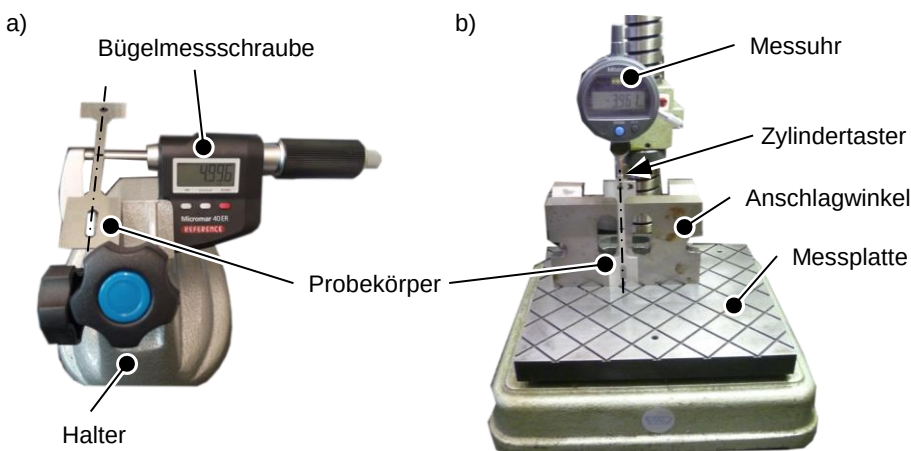


Bild 17: Erfassung der a) Breite mittels digitaler Bügelmessschraube und b) der Länge mittels Messplatte mit Anschlag und digitaler Messuhr [156]

Die lokale Breitung im Bereich der Nuten wurde mit einer Messschraube vom Typ Micromar 40ER 0-25mm der Firma Mahr GmbH mit einer Auflösung von 0,001 mm gemessen. Hierfür wurde entsprechend Bild 17 a) die Messschraube in einem Messmittelhalter eingespannt und die Probe rechtwinklig zu den Messflächen ausgerichtet. Mit diesem System kann eine Merkmalstoleranz von $\pm 30 \mu\text{m}$ sicher erfasst werden. Eine digitale Messuhr vom Typ ID-S112SB der Firma Mitutoyo mit 0,001 mm Auflösung und einem Messbereich von 12,5 mm wurde in Verbindung mit einer Messplatte eingesetzt, um die Gesamtlängung der geprägten Proben zu bestimmen. Wie in Bild 17 b) dargestellt ist, wurde in ein Aufspannwinkel verwendet, um eine rechtwinklige Ausrichtung der Probe sicherzustellen. Vor der Messung wurde die Messung mittels eines Endmaßes von 100 mm Länge genullt. Um den Einfluss durch das Absetzen und Abheben des Tasters möglichst gering zu halten, wurde ein Drahtabheber eingesetzt. Damit wird eine Eignung für eine Merkmalstoleranz von $\pm 50 \mu\text{m}$ erreicht. Die Längung Probe wurde bestimmt, indem vor und nach dem Prägen die Probenlänge gemessen wurde. Dadurch werden Einflüsse auf die gemessene Längung durch individuelle Schwankungen der initialen Probenlänge vermieden und Messgenauigkeit verbessert.

4.5.2 Auswertung der Mikrogeometrie

Neben der Makrogeometrie ist die Messung und Bewertung der lokalen Mikrogeometrie von Merkmalen wie die Schnittkantengeometrie, Kantenverrundung, die Nuttiefe sowie die Abbildungsgenauigkeit der Flankenwinkel von Relevanz. Hierfür wurden vorrangig optische Messmittel für die zwei- als auch dreidimensionale Messungen eingesetzt.

Konfokale Mikroskopie

Zur dreidimensionalen Messung der Oberflächenbeschaffenheit und der Geometrie der geprägten Nuten, kam ein Laser-Scanning Mikroskop (LSM) des Typs VK-X210 der Firma Keyence Corporation zum Einsatz. Das System basiert auf dem konfokalen Messprinzip mit Lochblende, bei welchem nur das reflektierte Licht der Bereiche in der Fokusebene auf den Bildsensor geleitet wird. Das reflektierte Licht anderer Bereiche hingegen durch eine Lochscheibe abgeschirmt. Durch das Verschieben des Fokus werden schrittweise unterschiedliche Ebenen erfasst und daraus ein dreidimensionales Höhenprofil zusammengesetzt. Das Gerät hat zum einen eine Weißlichtquelle in Kombination mit einem CCD Kamera-Chip und zum anderen mit Laserlichtquelle (Laserdiode mit 408 nm Wellenlänge). Dadurch wird

zu den hochaufgelösten, monochromatischen Bildern mit der Laserlichtquelle auch Farbbilder erfasst, welche überlagert werden können. Da es sich um ein Laser-Scanning Mikroskop handelt, wird das Laserlicht mittels einer Scanning-Optik über das Bauteil geführt und diese somit sukzessiv zeilenweise abgerastert. Für die Höhenmessung und die Fokusverschiebung ist eine hochpräzise Piezo-Achse im Einsatz mit einer minimalen Anzeigeauflösung von $0,0005\ \mu\text{m}$. Die Auflösung des Messsystems ist wesentlich durch das verwendete Objektiv und dessen Vergrößerung sowie numerische Apertur beeinflusst. In Abhängigkeit des verwendeten Objektivs ergibt sich auch ein abgestimmter Abstand der Fokusebenen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein 10x-Objektiv für die geometrische Erfassung von Merkmalen angewendet. Die Größe des Standardmessfelds des 10x-Objektivs beträgt $1,35 \times 1,00\ \text{mm}^2$. Die Aufnahme größerer Bereiche erfolgt mittels automatisierter Bildzusammensetzung (Stitching), indem einzelne leicht überlappende Bilder erfasst und anschließend mit einem Best-Fit-Algorithmus zu einem Gesamtbild zusammengesetzt werden. Aufnahmen der Nutgeometrien und der Seitenflächen wurden normal zur Oberfläche gemacht. Beim Erfassen der Nutgeometrien bedeutet das, dass steile Flanken aufgrund des optischen Messverfahrens nur mit einer begrenzten Anzahl an Stützpunkten abgebildet und somit die Flankenwinkel nicht verlässlich ausgewertet werden können. Daher wird hierfür die Auswertung von Schlifffildern herangezogen. Merkmale wie die Nuttiefe und lokale Ausbauchungen können jedoch mit hoher Genauigkeit erfasst werden. Zur Aufnahme der Einlegerkanten und der Verrundung wurden die Proben in einem Winkel von 45° angestellt, so dass die Kante den höchsten Punkt der Aufnahme darstellt. Dadurch wird eine ausreichende Intensität des reflektierten Lichts sichergestellt und dadurch eine gute und stabile Aufnahmequalität erreicht.

Metallographische Präparation und Auflichtmikroskopie

Für die Analyse der Abbildungsgenauigkeit insbesondere von steilen Flanken, welche mit konfokaler Mikroskopie nicht erfasst werden können, sowie zur Bewertung der Schnittkantenqualität wurden Methoden der metallographischen Präparation angewandt. Anhand von Querschliffen ist die zweidimensionale Messung mittels Auflichtmikroskopie möglich. Da ein Ätzen der Proben die optischen Eigenschaften Korngrenzen, Phasen und Kornoberflächen verändert, kann das Gefüge und lokale Verzerrungen des Gefüges sichtbar gemacht werden. Anhand von Farb- und Kontrastunterschiede können stark umgeformte Bereiche bestimmt werden. Um thermische Einflüsse auf die Proben zu vermeiden, wurden diese ausschließlich in kaltaushärtendem Epoxidharz Epoxy 1000 der Firma Cloeren Technology

GmbH eingebettet. Für die Bestimmung der Nutgeometrie wurden Proben nach dem Aushärten etwa um die halbe Stegbreite des Einlegers abgeschliffen, um den Bereich des ebenen Formänderungszustands untersuchen zu können. Das Abschleifen erfolgte mit SiC-Nassschleifpapieren der Körnungsstufe P120. Die Präparation erfolgte halbautomatisch mit der Schleif- und Poliermaschinen RotoPol 22 und Probenbewegern RotoForce 4 der Firma Struers GmbH. Der Probenbeweger ermöglicht die Aufnahme mehrerer Proben und sichert eine gleichmäßige Anpresskraft, da jede Probe separat belastet wird. Die Probe in den Körnungsstufen P120, P360, P500, P800, 1200, P2500 und P4000 mit einer Anpresskraft von 20 N und einer Geschwindigkeit von 150 U/min jeweils 4 min geschliffen. Für das Polieren wurden alkoholbasierte Diamantsuspensionen mit den Korngrößen 6 µm, 3 µm und 1 µm zusammen mit Schmiermittel verwendet. Das Polier- und Kühlmittel wurde über ein Dosiersystem Mulitdoser der Firma Struers GmbH zugeführt, wodurch gleichmäßige Bearbeitungsbedingungen sichergestellt wurden. Die Proben wurden im Gegenlauf bei 150 U/min jeweils 4 min lang poliert. Die Anpresskraft betrug 20 N mit einer Kraftreduktion gegen Ende des Poliervorgangs. Die geometrische Charakterisierung erfolgte anhand der polierten Schlitze. Entsprechend dieser Vorgehensweise wurden auch Proben für die Mikrohärtemessung präpariert.

Mittels Ätztechnik wurde durch das Anätzen der Korngrenzen das Gefüge sichtbar gemacht. Anhand dieser Gefügebilder wurden sowohl die initiale Korngröße und -verteilung bestimmt als auch Proben nach der Umformung untersucht. Durch die Gefügeätzung ist es möglich anhand der Verzerrung von Körnern qualitative Rückschlüsse auf die lokale Verteilung und den Grad der Umformung zu machen sowie den Werkstofffluss zu bewerten. Die verwendeten Ätzmittel sind in Tabelle 6 gelistet.

Tabelle 6: Parameter der Ätzung

Werkstoff	Ätzmittel	Ätzbedingungen
AlMg ₃	1000 ml destilliertes Wasser	Trocken ätzen, Ätzdauer 1 min 30 s
	8 ml Salpetersäure (HNO ₃)	
	2,5 ml Salzsäure (HCl)	
	7,5 ml Flußsäure (HF)	
CuSn ₆	100 ml Ethanol (C ₂ H ₆ O)	Trocken ätzen, Ätzdauer 10 s
	100 g Eisen(III)-Chlorid (FeCl ₃)	
	30 ml Salzsäure (HCl)	

Für die Auswertung der präparierten Gefügeschliffe standen verschiedene Auflichtmikroskope zur Verfügung. Hierzu gehörte das Auflichtmikroskop vom Typ ARISTOMET der Firma Leica Microsystems GmbH (vormals Leitz) in Verbindung mit einer digitalen Mikroskopkamera der Firma Olympus und ein Digitalmikroskop VHX 100 der Firma Keyence Corporation. Die Beleuchtung bei beiden Geräten ist rein konfokal.

4.5.3 Mikrohärtemessungen

Mittels Mikrohärtemessungen wurden die lokale Kaltverfestigung durch das Scherschneiden sowie durch das Prägen erfasst. Hierzu wurde das Messgerät Fischerscope HM2000 mit der zugehörigen Software WIN-HCU der Firma Helmut Fischer GmbH Institut für Elektronik und Messtechnik (vormals Helmut Fischer GmbH & Co. KG) eingesetzt. Das Gerät basiert auf dem Funktionsprinzip der instrumentierten Eindringprüfung nach DIN EN ISO 14577-1 [157]. Im Rahmen der Untersuchungen wurde ein pyramidenförmiger Vickers-Eindringkörper verwendet. Der Kraftbereich des Geräts liegt zwischen 0,4 mN bis 2000 mN und deckt damit den Kraftbereich der Mikrohärteprüfung nach Vickers gemäß DIN EN ISO 6507-1 [158] ab. Die Kraftauflösung liegt bei 0,04 mN und die Wegauflösung bei 0,1 nm über eine maximale Eindringtiefe von 150 μm . Das Messgerät ist mit einem motorisch angetriebenen Kreuztisch ausgestattet, wodurch eine automatisierte, flächige Messung von Härteverteilungen auf Basis eines Messpunktrasters möglich ist. Die Messungen wurden an planparallel geschliffenen Proben mit polierter Messfläche in Anlehnung an DIN EN ISO 6507-1 [158] durchgeführt. Entsprechend der dort aufgeführten Mindestrandabstände wurde das 2,5-fache der Eindringdiagonale d für die Kupferlegierung und das 3-fache bei der Aluminiumlegierung gewählt. Die Messpunktabstände wiederum waren für die Kupferlegierung das 3-fache und für die Aluminiumlegierung das 6-fache der Eindringdiagonale. Um ähnliche Eindringdiagonalen sowohl für die Aluminiumlegierung ($d = 18 \mu\text{m}$) als auch die Kupferlegierung ($d = 16 \mu\text{m}$) zu erreichen, wurde eine Prüflast von 100 mN für AlMg3 und von 200 mN CuSn6 gewählt. Entsprechend DIN EN ISO 6507-1 [158] lag die Einwirkdauer für alle Prüfungen bei 10 s. Daraus resultiert ein Randabstand von Rand- und Messpunktabstand von etwa 50 μm für CuSn6. Wohingegen für AlMg3 etwa 60 μm Abstand zum Rand und 110 μm als Messpunktabstand abgeleitet wurden. Für eine korrekte Messung der Mikrohärte mittels Eindringprüfung ist es notwendig, dass die Eindringtiefe nicht durch eine elastische Verformung der Einbettmasse verfälscht wird. Diese Gefahr besteht insbesondere bei der Verwendung von Epoxid-

harz, da dieses einen deutlich geringeren E-Modul im Vergleich zu den metallischen Proben aufweist. Die Proben wurden daher so eingebettet, dass diese durch die Einbettung hindurchreichen und nicht von Einbettmittel unterfüttert sind. Dadurch wird eine unmittelbare Auflage der Proben auf dem Messtisch während der Härtemessung erreicht und ein Einfluss der Einbettmasse ausgeschlossen. Um die Härteverteilung im Bereich der Nuten im Längsschnitt zu untersuchen, wurden daher Blechstreifen mit einer Breite von etwa 20 mm geprägt und anschließend eingebettet. Dadurch wurde eine stabile Einbettung erreicht. Da die Mittelebene der Probe präpariert wurde, kann der Einfluss durch die Probenbreite auf die Nutgeometrie ausgeschlossen werden.

4.6 Numerische Simulation

Für die numerischen Untersuchungen wurde die Finite-Elemente-Methode (FEM) angewendet. Es handelt sich dabei um ein Näherungsverfahren, welches auf dem Kernaspekt der Diskretisierung von Körpern in endlich kleine Elemente beruht. Das Gesamtmodell entspricht somit der Summe dieser Elemente inklusive der definierten Bedingungen [159].

Die eingesetzte Simulationssoftware Simufact Forming der Simufact Engineering GmbH in der Version 12.0 wurde speziell für die Abbildung von Umformprozessen entwickelt. Sie basiert auf impliziten Berechnungsverfahren und es sind sowohl ideal plastische als auch elastisch-plastische Stoffmodelle implementiert. Das implizite Berechnungsverfahren ist besonders bei Prozessen, welche als quasistatisch betrachtet werden können gut geeignet, was in der Massivumformung vorrangig der Fall ist [160]. Für die Vernetzung stehen sowohl Hexaederelemente als auch Tetraederelemente zur Verfügung. Während Tetraederelemente vorteilhaft sind für die robuste Vernetzung komplexer Geometrien [161], zeichnen sich Hexaederelemente durch die besseren Berechnungsergebnisse aus aufgrund der höheren Anzahl an Integrationspunkten [159].

Die numerische Simulation wurde im Rahmen der Untersuchungen zur Prozessauslegung im Hinblick auf die Werkzeugbelastung sowie für die Analyse des Stoffflusses und nicht direkt messbarer Größen wie dem Umformgrad verwendet. Über die Einbindung benutzerdefinierter Materialkarten wurde eine hohe Abbildungsgenauigkeit des Werkstoffverhaltens sichergestellt. Aufgrund der dominanten Druckbeanspruchung, die beim Prägen vorherrscht, wurden Fließkurven, welche im Schichtstauchversuch ermittelt wurden, in den verwendeten Materialkarten hinterlegt. Die Modellierung der Werkstoffe basiert auf einer isotropen Materialdefinition, da

vorwiegend geringes Werkstoffvolumen massiv umgeformt wird. Die tribologischen Bedingungen wurden im Modell mittels des Reibzahlmodells nach Coulomb abgebildet, entsprechend dem Vorgehen in [110].

Für die Diskretisierung des Werkstücks wurden Hexaederelemente verwendet. Die Modellierung des Prägeprozesses muss hinreichend fein vernetzt sein, um auch kleinen Merkmale gut abbilden zu können. Dies resultiert in einer hohen Elementanzahl und folglich einer langen Rechendauer. Daher wurde mittels lokaler Verfeinerungsboxen insbesondere an scharfen Kanten eine kleine Elementlänge erreicht.

Für das Kantenprägen und die für die Umformung in der Längsebene beim Nutprägen kann ein ebener Formänderungszustand angenommen werden, daher wurden für die Umformanalyse 2D-Modelle eingesetzt. Das Einprägen von Nuten im Randbereich ist durch einen dreiachsigen Spannungs- und Dehnungszustand gekennzeichnet und wurde als 3D-Modell numerisch abgebildet. Der Aufbau der jeweiligen Simulationsmodelle wird in Abschnitt 5.2 erläutert.

5 Auslegung des Folgeverbundprozesses

Der Folgeverbundprozess setzt sich aus mehreren Schneid- und Prägeoperationen zusammen. Diese sollen im Einzelnen nachfolgend in ihren spezifischen Charakteristiken erläutert werden. Auf Basis der Einzeloperationen wurde ein modulares Folgeverbundwerkzeug erarbeitet und die jeweiligen Prozessstufen darin zusammengefasst. Im Hinblick auf die Gesamtprozesskette in Bild 18 und die Weiterbearbeitung im Montagspritzguss wurde explizit auf den Einsatz von Schmierstoff im Folgeverbundprozess verzichtet. Dadurch wird der Reinigungsaufwand und der Bedarf an Betriebsstoffen gesenkt, was im Sinne einer verkürzten Prozesskette zu einer höheren Effizienz und Ressourcenschonung in der Produktion beiträgt.

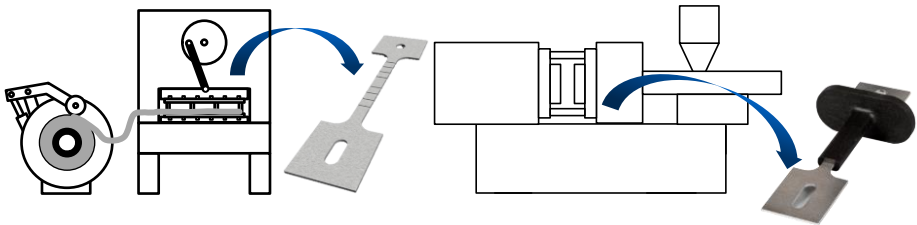


Bild 18: Prozesskette aus Folgeverbundprozess und Montagespritzguss

Aus dem Stand der Technik ist bekannt, dass die Rissbildung an scharfen Kanten der Einleger und die Spaltbildung zwischen Einleger und Kunststoff zwei Versagensbilder sind, die zur Undichtheit von Kunststoff-Metall-Hybridbauteile führen. Gleichzeitig wurde gezeigt, dass Nuten oder Rillen auf der Einlegeroberfläche eine positive Wirkung hinsichtlich der Erhöhung der Dichtheit haben. Daraus ergeben sich aus der Perspektive der Kunststoffverarbeitung mehrere Anforderungen. Einerseits sollten zur Reduktion der Spannungskonzentration die Kanten verrundet sein und andererseits sollten die Einleger mit Quernuten strukturiert sein, um die Dichtwirkung zu steigern. Im Hinblick auf die Serienproduktion metallischer Einleger gilt es diese zentralen Anforderungen für die Dichtheit kosteneffizient und mit kurzen Prozesszeiten umzusetzen. Es leitet sich hieraus die folgende dreistufige Prozessfolge gemäß Bild 19 für die umformtechnische Herstellung der Einleger ab.

Zunächst wird das Scherschneiden als hochproduktives Verfahren zur Erzeugung der Grundgeometrie des Einlegers eingesetzt. Gleichzeitig ergeben sich aus der Schneidoperation spezifische geometrische sowie mechanische Eigenschaften der Schnittkante, welche sich auf die Folgeprozesse

auswirken. In der zweiten Stufe erfolgt das Kantenprägen, um in einer linearen Bewegung scharfe Kanten des Einlegers zu verrunden. In der dritten Prozessstufe werden Quernuten geprägt, um dadurch die Dichtheit mit dem technischen Ansatz einer Labyrinthdichtung zu verbessern.

Über die direkten Anforderungen bzgl. der Dichtheit hinaus ergeben sich weitere prozesstechnische Anforderungen des Montagespritzgussprozesses. Hierzu gehören enge geometrische Toleranzen, um ein prozesssicheres Einlegen sowie eine gute Abdichtung der Kavität im Spritzgießwerkzeug sicherzustellen und eine Gratbildung zu vermeiden. Gleichzeitig muss der Einleger ausreichend stabil sein, um eine automatische Handhabung zur ermöglichen, ohne dabei zu verformen. Zusätzlich ist die Steifigkeit des Einlegers relevant, so dass keine Deformation beim Einspritzen der Kunststoffschmelze in die Kavität auftritt, was wiederum zu einer ungleichmäßigen Schwindung des Kunststoffs führen kann.

Aufgrund des Bedarfs großer Stückzahlen und der effizienten Fertigung werden Einleger für den Montagespritzguss in der Regel auf weggebundenen Schnellläuferpressen hergestellt. Durch die festgelegte Lage des unteren Totpunkts wirken sich Toleranzschwankungen der Dicke des Halbzeugs auf die Prägeprozesse aus. Daher ist die Bewertung der Prozesssensitivität relevant für eine konstante Bauteilqualität.

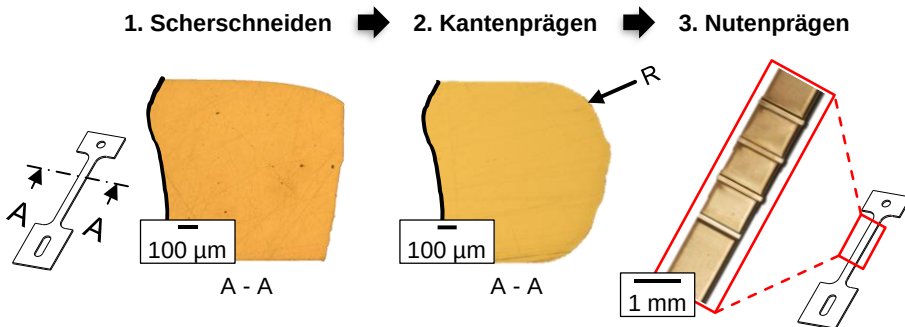


Bild 19: Prozessfolge im Folgeverbund aus Scherschneiden, Kantenprägen und Nutenprägen

Das Kapitel ist entsprechend der Prozessfolge des Folgeverbunds in Bild 19 gegliedert. Es werden zunächst die einzelnen Prozesse und deren Auslegung beschrieben und abschließend die Umsetzung in einem modularen Folgeverbundwerkzeug vorgestellt.

5.1 Scherschneidprozess

Das Scherschneiden wird typischerweise als hochproduktiver Fertigungsprozess gleicher Bauteile eingesetzt. Es können enge Toleranzen mit geringer Streuung gefertigt werden [37]. Im Folgeverbundprozess wird die Einleergeometrie mittels Scherschneiden erzeugt. Dieser Schneidprozess beeinflusst die Bauteileigenschaften und die Abfolge der Schneidoperationen hinsichtlich einer gleichmäßigen Lastverteilung. Nachfolgend werden die Untersuchungen der Schnittkantenqualität und der die Auslegung des Streifenbilds erläutert.

5.1.1 Analyse der Einflüsse auf die Schnittkantenqualität

Die Auswirkungen unterschiedlicher Einflüsse auf den Schneidprozess und auf die Schnittkantenqualität wurde auf Basis von Schneidversuchen in [151] bewertet. Im Einzelnen wurde sowohl der Schneidspalt als auch die Schnittgeschwindigkeit variiert. Hierfür wurde ein Lochwerkzeug mit austauschbaren Schneidmatrizen eingesetzt. Damit wurde der bezogene Schneidspalt in den Stufen 2; 5; 10; 15; 20 und 25 % variiert, um einen geeigneten Schneidspalt zu identifizieren und das Verhalten in den Grenzbereich der industriell üblichen Schneidspalte abzuprüfen. Darüber hinaus wurden Schneidversuche auf einer Universalprüfmaschine durchgeführt und mit Versuchen auf der Schnellläuferpresse verglichen, um den Einfluss der Schneidgeschwindigkeit zu analysieren. Als Bewertungskriterium dienen die Schnittflächenkenngrößen nach VDI 2906-2 [50]. Diese wurden an Querschliffen geschnittener Proben ermittelt.

Die Auswertungen der Schnittflächenkenngrößen des Kanteneinzugs und des Glattschnittbereichs sind in Bild 20 dargestellt. Hinsichtlich des Kanteneinzugs verhalten sich beide Werkstoffe ähnlich, so dass mit größerem Schneidspalt sowohl die Einzugsbreite als auch die Einzugshöhe zunimmt. Bis zu einem bezogenen Schneidspalt von 15 % ist die Einzugsbreite bei CuSn6 geringer. Für größere Schneidspalte gleichen sich die Werte der beiden Werkstoffe an. Die Einzugshöhe ist zunächst für beide Werkstoffe gleich und erst für 20 % und 25 % Schneidspalt ist die Kanteneinzugshöhe für CuSn6 größer. Bei AlMg3 sind größere Schwankungen insbesondere im Zusammenhang mit der Schnellläuferpresse festzustellen.

Hinsichtlich des Glattschnittanteils zeigen beide Werkstoffe ein sehr ähnliches Verhalten und Werte. Der Glattschnitt nimmt mit größer werdendem Schneidspalt ab, wobei ab einem bezogenen Schneidspalt von 15 % der

Effekt geringer wird und in ein Plateau übergeht. Infolge des hohen Biegeanteils herrschen hier anderen Bedingungen vor, da die Scherzone zunehmen mit Zugspannungsanteilen überlagert wird. Für einen sehr kleinen bezogenen Schneidspalt von 2 % tritt bei CuSn6 eine Erhöhung des Glattschnittanteils von 40 % auf etwa 70 % auf, was auf die hohe Duktilität des verwendeten Werkstoffs mit einer Bruchdehnung von 35 % zurückgeführt werden kann. Ein solches Verhalten kann für AlMg3 mit einer Bruchdehnung von 25 % nicht festgestellt werden. Hier tritt nur für Proben, welche mit hoher Schneidgeschwindigkeit geschnitten wurden, ein höherer Glattschnittanteil auf. Gleichzeitig ist dies mit einer höheren Streuung verbunden, was eine ungleichmäßige Ausbildung der Glattschnittzone verdeutlicht und auf instabile Prozessbedingungen schließen lässt trotz des hohen Glattschnittanteils.

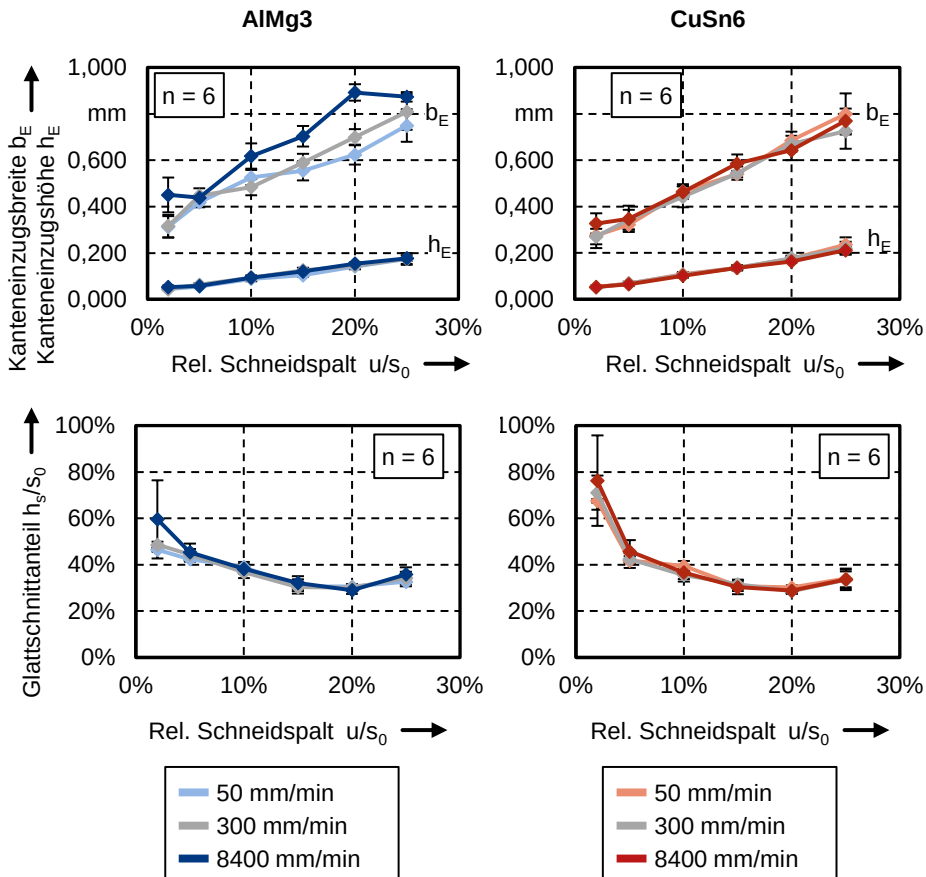


Bild 20: Vergleich von Kanteneinzug und Glattschnittanteil [151]

Während der Glattschnittanteil in der Regel von besonderem Interesse als Funktionsfläche ist, sind der Bruchflächenanteil und der Bruchwinkel in Bild 21 relevant als Einflussgröße auf die Prägeprozesse zur Kantenverrundung. Die Bruchflächenanteile verhalten sich komplementär zum Glattschnittanteil bei beiden Werkstoffen. Der Bruchwinkel weist einen tendenziell linearen Zusammenhang in Abhängigkeit des Schneidspalts auf. Die Abnahme des Bruchwinkels ist dominant durch das Werkzeug beeinflusst, da für beide Werkstoffe vergleichbare Werte gemessen werden. Lediglich in den Grenzbereichen bei 2 % und 25 % können Abweichungen festgestellt werden, was durch Prozessinstabilitäten und sich ändernde Prozessmechanismen zu erklären ist.

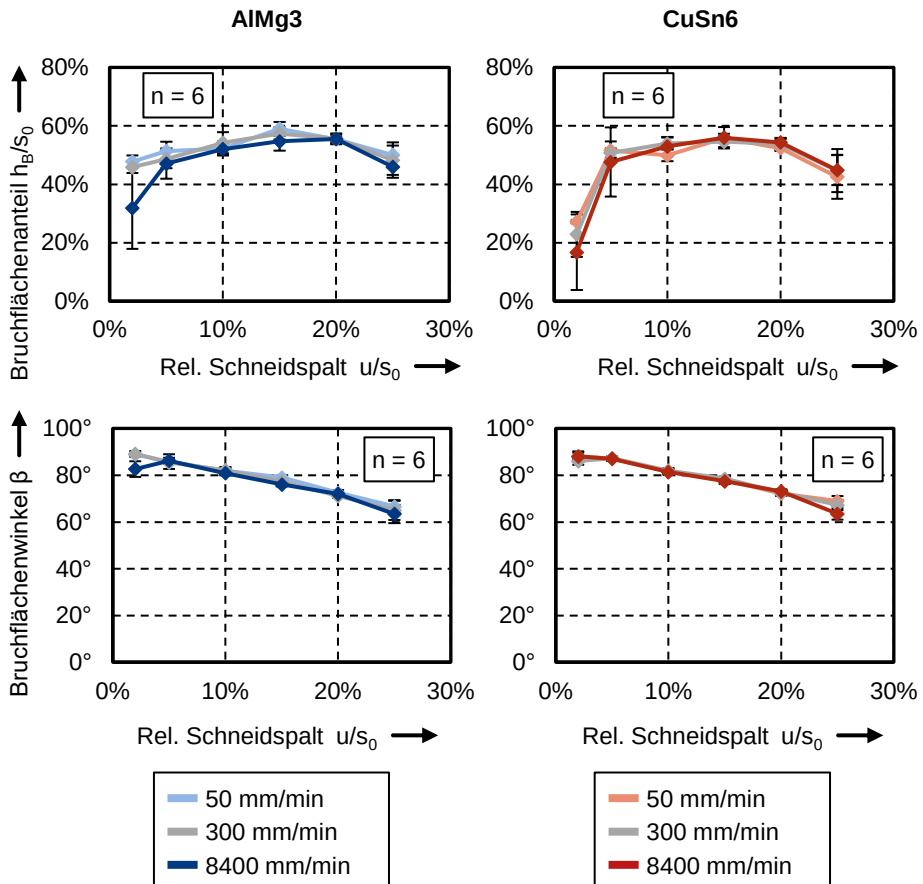


Bild 21: Vergleich Bruchanteil und Bruchwinkel [151]

Über alle Schnittflächenkenngrößen hinweg kann kein signifikanter Einfluss der Schneidgeschwindigkeit zwischen 50 mm/min bei Verwendung

der Universalprüfmaschine und 8400 mm/min auf der Schnellläuferpresse ausgemacht werden. Daher kann von einer Übertragbarkeit der Erkenntnisse in diesem Bereich ausgegangen werden.

Anhand der Schnittkantenaufnahmen in Bild 22 und Bild 23 werden die Ausbildung und die Gleichmäßigkeit der Schnittkanten deutlich. Dabei sind die technisch relevanten Schneidspalte mit hohem Glattschnittanteil bis 15 % bezogenem Schneidspalt dargestellt.

AlMg3; $s_0 = 1,0 \text{ mm}$; $v = 8400 \text{ mm/min}$

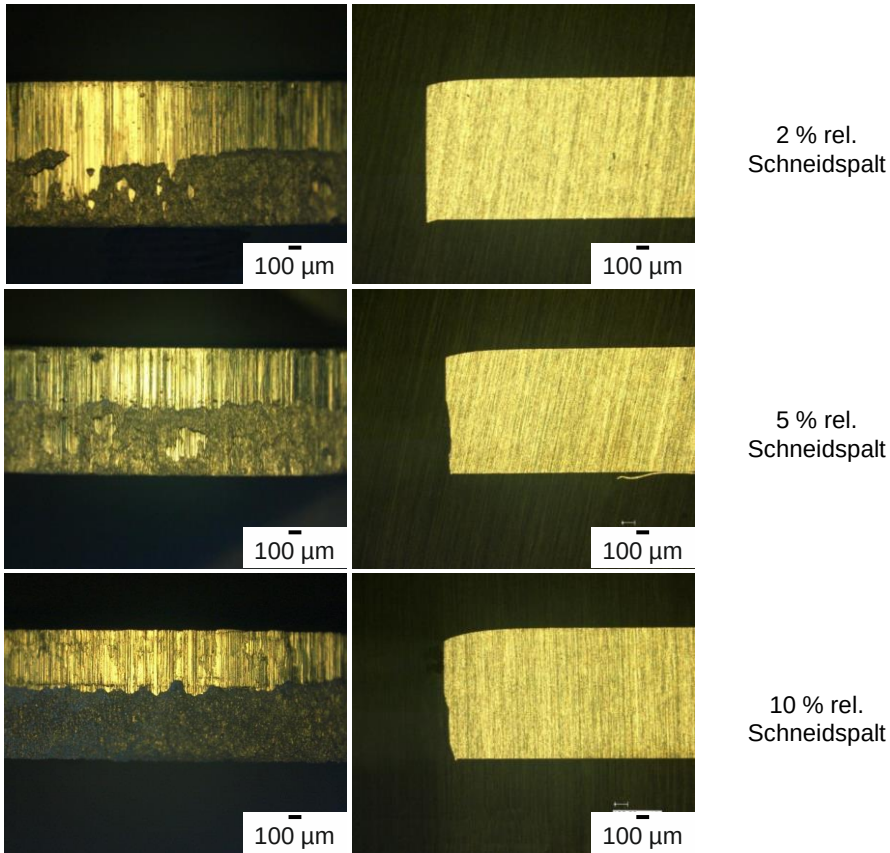


Bild 22: Mikroskopische Aufnahmen der Schnittkante von AlMg3-Proben [151]

Bei AlMg3 ist eine unregelmäßige Schnittkante erkennbar und insbesondere bei 2 % Schneidspalt treten verstärkt Sekundärglattschnittanteile, die sogenannte Zipfelbildung auf. Dadurch können die großen Standardabweichungen bei der geometrischen Auswertung in Bild 20 begründet werden.

Auch bei einem Schneidspalt von 5 % findet sich noch vereinzelt Zipfelbildung. Die verschiedenen Schnittkantenbereiche weisen weniger Schwankungen auf und sind im Querschliff deutlich unterscheidbar. Ab einem Schneidspalt von 10 % wird eine gleichmäßige Bruchzone gebildet ohne Sekundärglattschnittanteile. Bei AlMg3 ist eine unruhige Bruchkante mit teilweise schalenförmigen Abrissen festzustellen.

CuSn6; $s_0 = 1,0 \text{ mm}$; $v = 8400 \text{ mm/min}$

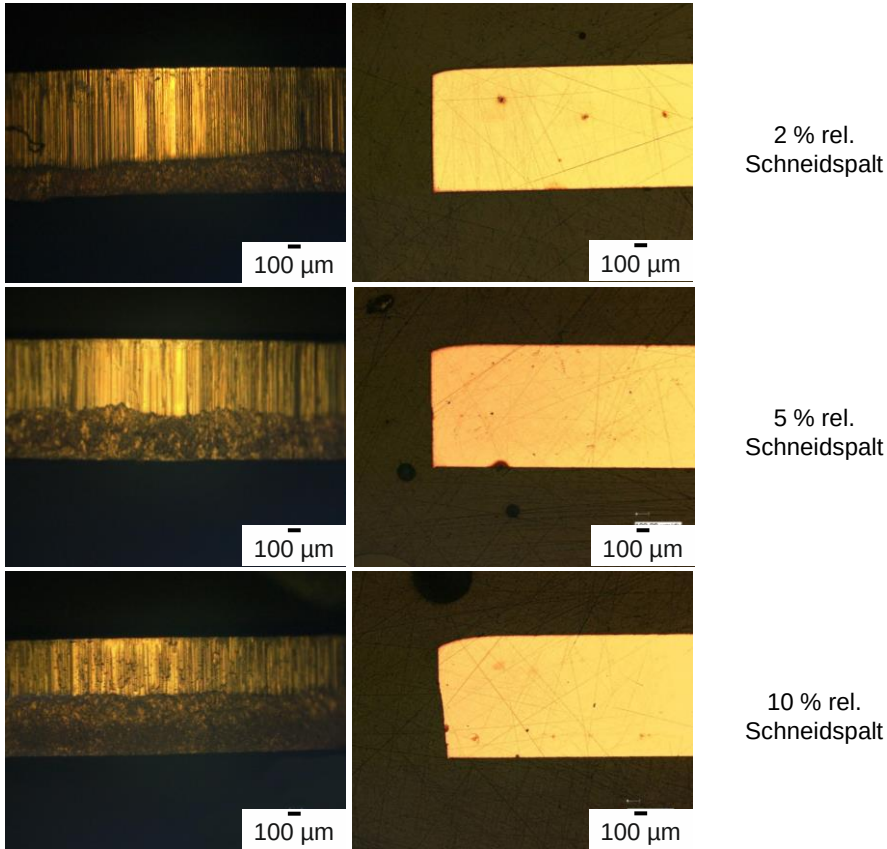


Bild 23: Mikroskopische Aufnahmen der Schnittkante von CuSn6-Proben [151]

Im Gegensatz zu AlMg3 tritt bei CuSn6 keine Zipfelbildung auf. Für 2 % bezogenem Schneidspalt variiert der Glattschnittanteil über größere Bereiche, was die höhere Streuung in Bild 20 erklärt. Es davon auszugehen, dass insbesondere bei diesem geringen Schneidspalt sich leichte Toleranzabweichung der Konzentrizität von Stempel und Schneidmatrize zu einer merklichen Schwankung des Glattschnittanteils führen. Die Bruchkante ist

gleichmäßiger als bei AlMg3 und bereits bei einem Schneidspalt von 5 % bildet sich eine regelmäßige Bruchzone aus.

Auf Basis der Schnittkantenanalyse wurde für die Auslegung des Folgeverbundwerkzeugs ein bezogener Schneidspalt $u/s = 5\%$ gewählt. Dadurch ist die Fertigung von Einlegern mit hohem Glattschnittanteil gewährleistet und durch den somit resultierenden absoluten Schneidspalt $u = 0,05\text{ mm}$ ist die Sensitivität bzgl. Fertigungstoleranzen reduziert.

Infolge des Scherschneidprozesses und der auftretenden Kaltverfestigung kommt es zu einer gradierten Härteverteilung im Bereich der Schnittkante. Diese wurde mittels Mikrohärtemessungen über ein Messpunktraster ermittelt, so dass eine flächige Darstellung der Härteverteilung in Bild 24 und Bild 25 möglich ist. Um eine hohe lokale Auflösung im Verhältnis zu den Schnittkantengrößen zu erreichen, wurde für beide Werkstoffe ein Messpunktabstand von $50\text{ }\mu\text{m}$ gewählt. Aufgrund der unterschiedlichen Festigkeiten der beiden Werkstoffe wurde die Messkraft entsprechend angepasst. Für die Messungen wurde für AlMg3 eine Messkraft von 100 mN und für CuSn6 eine Kraft von 200 mN gewählt. Die Eindringzeit von 5 s und eine Einwirkdauer von 10 s sind bei allen Messungen identisch. Die Messungen wurden an den Schnittkanten des Stegs mit einem bezogenen Schneidspalt von 5% durchgeführt. Die Variation der Werte zwischen rechtem und linken Schnittufer ist einerseits durch Fertigungstoleranzen des Werkzeugs und andererseits durch die Position des Messpunktrasters bedingt.

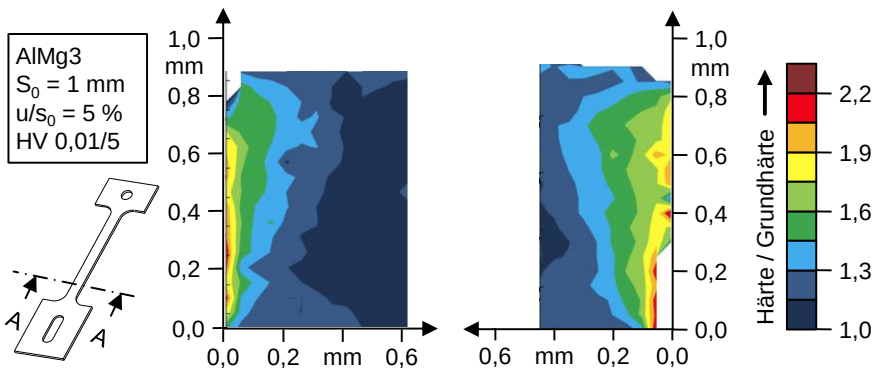


Bild 24: Mikrohärtemessungen der Schnittkante von AlMg3 [162]

Die Grundhärte von AlMg3 beträgt $75\text{ HV}_{0,01}$, die von CuSn6 liegt bei $166\text{ HV}_{0,02}$ und ist damit etwa doppelt so hoch im Vergleich zu AlMg3. Bei beiden Werkstoffen bildet sich entsprechend Bild 24 und Bild 25 eine cha-

rakteristische Form der Verfestigungszone aus, welche Ähnlichkeit zu einer umgekehrten Tropfenform aufweist. Die größte Ausdehnung ausgehend von der Schnittkante tritt im Bereich der Glattschnittzone auf und verjüngt sich gleichmäßig über die Blechdicke. Die Bereiche höchster Festigkeit befinden sich in der Bruchzone, sind oberflächennah und haben nur eine geringe Ausdehnung in die Blechebene. In dieser Zone tritt die höchste Scherung und infolgedessen das Werkstoffversagen während des Schneidvorgangs auf.

Die maximale Härtezunahme von AlMg3 liegt bei dem 2,13-fachen der Grundhärte. Der geschlossene hellblaue Bereich mit Werten über dem 1,3-fachen in Bild 24 markiert die Grenze der verfestigten Zone. Diese erstreckt sich ausgehend von der Schnittkante bis etwa 0,33 mm in die Blechebene.

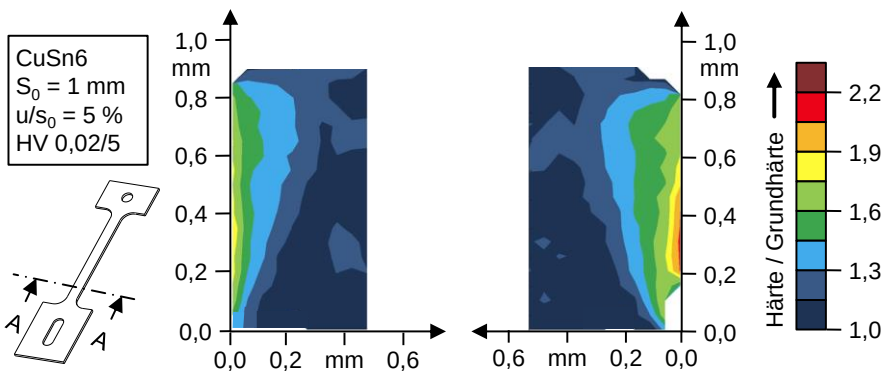


Bild 25: Mikrohärtemessungen der Schnittkante von CuSn6 [162]

Im Vergleich zu AlMg3 liegt die Härtezunahme bei CuSn6 mit der 2,17-fachen Grundhärte etwas höher. Die Ausdehnung der verfestigten Zone von CuSn6 mit Werten über dem 1,3-fachen der Grundhärte ist etwa 0,23 mm und somit 0,1 mm kleiner als bei AlMg3. Hinsichtlich der relativen Schnittkantenverfestigung weisen beide Werkstoffe ein ähnliches Verhalten auf.

5.1.2 Auslegung des Streifenbilds

Ausgehend von der in Abschnitt 4.4 beschriebenen Einlegergeometrie wurde ein Streifenbild erarbeitet, welches die Anforderung einer exakten Positionierung im Folgeverbundprozess erfüllt, eine flexible und kostengünstige Anpassung der Einlegergeometrie erlaubt sowie eine hohe Materialausnutzung mit minimalem Abfall ermöglicht. Grundsätzlich ist die Kombination aus Loch und Langloch auf für die exakte Positionierung im Folgeverbundprozess geeignet. Da im Folgeverbundwerkzeug jedoch

mehrfach mittels Sucherstifte in verschiedenen Stufen in diese Geometrien eingetaucht werden muss, kann dies bei einer Fehlpositionierung zu einer Belastung der Lochgeometrien führen und sich final auf deren Genauigkeit auswirken. Eine enge Tolerierung mit einer Genauigkeit H7 ist jedoch für die Weiterverarbeitung und die Positionierung im Montagespritzgießprozess erforderlich. Nachfolgend wird die Kombination aus Loch und Langloch als Positionierungslöcher bezeichnet. Darüber hinaus würde die ausschließliche Positionierung über diese Geometrien in Verbindung mit der geringen Probenbreite von 25 mm teilweise in sehr geringen Abständen der Positionierelemente und der Schneidaktivteile resultieren. Dies ist sowohl fertigungstechnisch mit Herausforderungen verbunden als auch ungünstig hinsichtlich der Werkzeugbelastung. Daher wurden separate Sucherlöcher konzipiert, welche im Randbereich des Einlegers platziert sind. In diesem Bereich beeinflussen die Sucherlöcher Eigenschaften der Probekörper nicht und gleichzeitig ist die Handhabung mittels Parallelgreifer gewährleistet. Durch diese Anordnung ist in jeder Stufe eine Positionierung nahe an der Schneidoperation möglich, so dass enge Maß- und Lagetoleranzen eingehalten werden können. Die wesentlichen Maßtoleranzen für die Weiterverarbeitung sind in Bild 26 dargestellt. Die Stegbreite ist auf $\pm 0,03$ mm toleriert, um ein Abdichten der Kavität und ein gratfreies Umspritzen sicherzustellen.

In Bild 26 ist das Streifenbild gezeigt, die einzelnen Schneidoperationen sind gelb hervorgehoben. In der ersten Stufe werden vier Sucherlöcher geschnitten, wobei die mittleren beiden Löcher nur der Positionierung bei manuellem Vorschub dienen und im automatisierten Prozess keine Rolle spielen. Beim Anschneiden wird die Blechkante so zu platziert, dass diese später etwa mittig zwischen den Sucherlöchern und den Positionierungslöchern liegt. Dadurch wird während des Anschneidens vermieden, dass Löcher nur teilweise ausgeschnitten werden [37], was mit der Gefahr hochgerissener Butzen verbunden ist. In Stufe 4 werden die Positionierungslöcher eingebracht. Die große Anzahl an Leerstufen ist dem modularen Werkzeugkonzept mit austauschbaren Aktivteilen geschuldet, welches in Abschnitt 5.3 erläutert wird. Der Steg wird in zwei Schritten freigeschnitten. Zunächst entsteht in Stufe 6 das rechte Schnittufer und in der nachfolgenden Stufe 7 wird mit demselben Stempel die linke Seite geschnitten. Dadurch ist es möglich, mit der Variation dieses einen Stempels unterschiedliche Stegvarianten hinsichtlich Breite und Kontur zu fertigen.

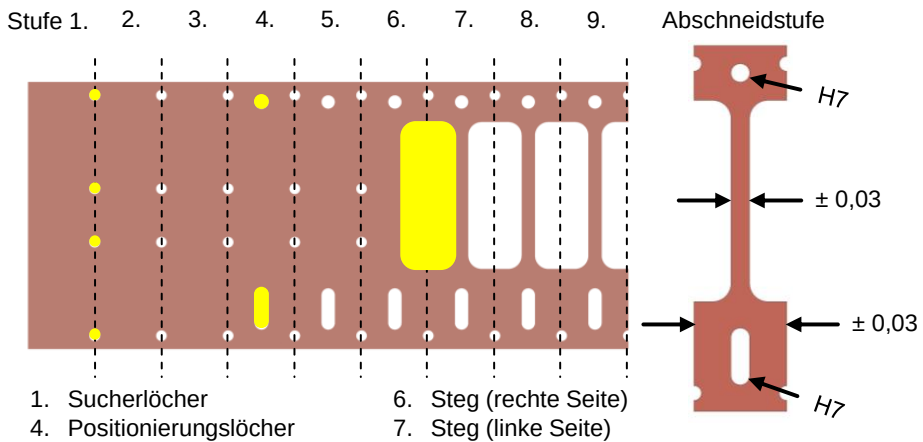


Bild 26: Streifenbild und Stufenfolge der Einlegergeometrie und wesentliche Toleranzen

In den nachfolgenden Leerstufen kann ein weiterer Schneidstempel eingesetzt werden, so dass auch Einleger mit zwei Stegen realisiert werden können. Dies kann durch eine Kombination aus schmalen Stempeln in Stufe 6, was zu einem breiten Steg führt, und einem weiteren Stempel, der diesen Steg nochmals in der Mitte locht, erreicht werden. Die Vereinzelung der Einleger erfolgt in einer Abschneidstufe, in welcher die Einleger vom Streifen abgeschnitten werden. Diese abfallfreie Methode der Vereinzelung ist werkstoffeffizient und es sind keine zusätzlichen Maßnahmen zur Zerkleinerung von Streifenüberresten notwendig. Dies ist jedoch damit verbunden, dass ein gefederter Gegenhalter in Form eines Federbodens eingesetzt wird, mit dem ein Abknicken des Einlegers während des Abschneidens verhindert wird, um einer negativen Beeinflussung der Schnittkantenqualität und der Maßhaltigkeit vorzubeugen. Durch das Vereinzeln mittels Abschneiden ergibt sich als Vorschublänge die Einlegerbreite von 25 mm.

5.2 Prägeprozess

Für die Strukturierung und das Verrunden der Schnittkanten wurden offene Prägeprozesse gewählt. Dabei erfolgt das Prägen nicht einem geschlossenen Gesenk, was in der Regel mit hohen Prozesskräften verbunden ist und sehr sensitiv ist hinsichtlich des Bauteilvolumens und der Formfüllung. Bei vollständiger Formfüllung oder flächigem Kontakt kommt es zu einem sprunghaften Kraftanstieg. Gleichzeitig besteht der größte Kraftbedarf beim Prägen im unteren Totpunkt (UT). Da metallische Einleger üblicherweise auf einer weggebundenen mechanischen Schnellläuferpresse hergestellt werden, kann es bei Überlast im UT zu einem Verspannen des

gesamten Systems kommen, was zu einer Schädigung der Presse führen kann. Durch den weggebundenen Prozess sind bereits Maßschwankungen im Bereich der Dickentoleranz des Halbzeugs mit stark schwankendem Kraftbedarf verbunden. Durch den Einsatz offener Prägeprozesse soll der steile Kraftanstieg bei vollständiger Formfüllung vermieden werden. Ziel ist es, eine Sicherheit gegen die Überlastung von Werkzeug und Maschine zu schaffen, da anders als bei hydraulischen Pressen der Prozess nicht kraftgeregelt ablaufen kann.

5.2.1 Kantenprägen

Der Kantenprägeprozess für das umformtechnische Verrunden der Einlegerkanten besteht gemäß Bild 27 a) aus zwei Stempel. Beide Stempel haben eine Kavität mit definierte Innenradien, welche den Eckradius R_1 des Einlegers bestimmen. Die Breite der Kavität entspricht der Stegbreite des Einlegers. Dadurch werden die scharfen Kanten des Einlegerstegs beim Schließen des Werkzeugs umgeformt. Ziel ist es, die Spannungskonzentration an scharfen Kanten in der Kunststoffkomponente bei umspritzten Einlegern zu reduzieren und somit die Rissbildung zu vermeiden.

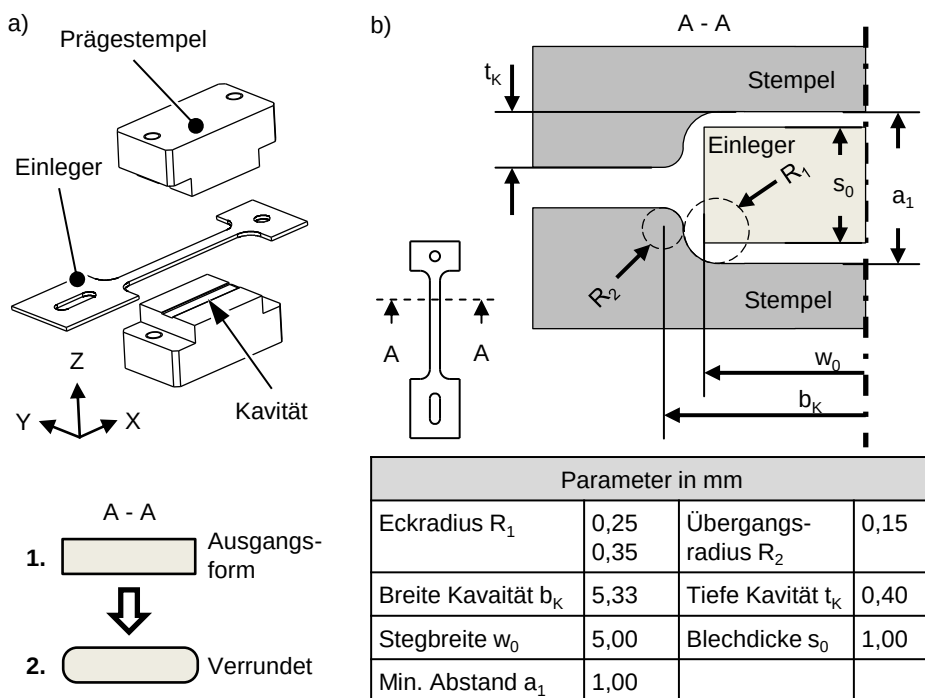


Bild 27: a) Kantenprägenprozess und b) Schnittdarstellung mit Kenngrößen der Kavität

Es handelt sich dabei um einen offenen Prägeprozess, da in der Endposition kein Kontakt zwischen den beiden Prägestempeln besteht und somit eine geschlossene Kavität vorliegt. Die Geometrie der Kavität in Bild 27 b) ist durch eine konstante Breite b_k definiert, welche den Abstand der Mittelpunkte der beiden Übergangsradien R_2 beschreibt. Die beiden Radien R_1 und R_2 sind über eine tangentielle Beziehung miteinander verknüpft. Die Kavität ist so konzipiert, dass die Radien als Zentrierung für die Einleger dienen und die Kanten des Einlegers auf die Innenradien der Kavität treffen. Im Prozess ist vorgesehen, dass der Mindestabstand a_i der Kavitäten der Nennblechdicke entspricht und es theoretisch zu keiner Stauchung des Einlegers kommt. Die Basisgeometrie der Kavität auf einen Eckradius von 0,25 mm ausgelegt, was einem Abstand der Mittelpunkte der Innenradien von 4,53 mm entspricht. Daraus resultiert eine theoretische Breite der Kavität von 5,03 mm, was der oberen Toleranzgrenze der Stegbreite des Einlegers entspricht. Damit wird sichergestellt, dass die Einleger auch im Grenzfall prozesssicher eingelegt werden können. Im Rahmen der Untersuchungen wurde der Eckradius zwischen 0,25 mm 0,35 mm variiert. Durch die geometrische Definition der Kavitäten bedeutet das, dass bei dem größeren Eckradius $R_1 = 0,35$ mm die Querschnittsfläche der Kavität kleiner ist und somit mehr Werkstoffvolumen umgeformt wird im Vergleich zu einem kleineren Radius. Wie in Bild 28 dargestellt, wurde der kleinere Eckradius der Kavität so gewählt, dass auch im Einzugsbereich von schergeschnittenen Bauteilen eine Verrundung sichergestellt ist.

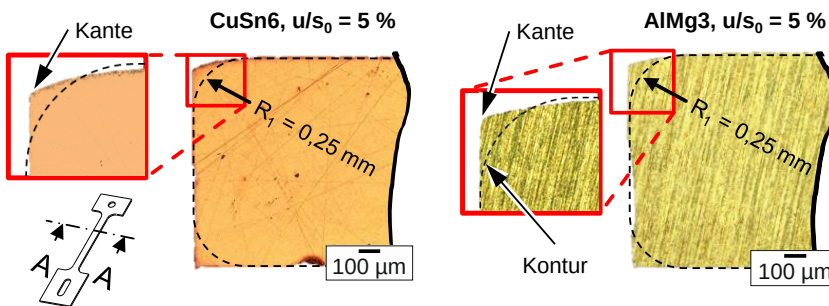


Bild 28: Vergleich der idealen verrundeten Kontur mit Schnittkanten aus CuSn6 und AlMg3

Da sich das Kantenprägen im Verhältnis zur Probenbreite über einen weiten Bereich entlang der Längsachse des Einlegers erstreckt, kann von einem ebenen Formänderungszustand ausgegangen werden, weshalb die zweidimensionale Prozessmodellierung eine gute Näherung darstellt. Um den

Kantenprägeprozess numerisch zu analysieren, wurde ein 2D-Modell erarbeitet. Entsprechend Bild 29 erlaubt dies eine starke Netzverfeinerung, um die kleinen Abmessungen der Kanten geometrie in hoher Auflösung und bei moderater Berechnungsdauer abzubilden.

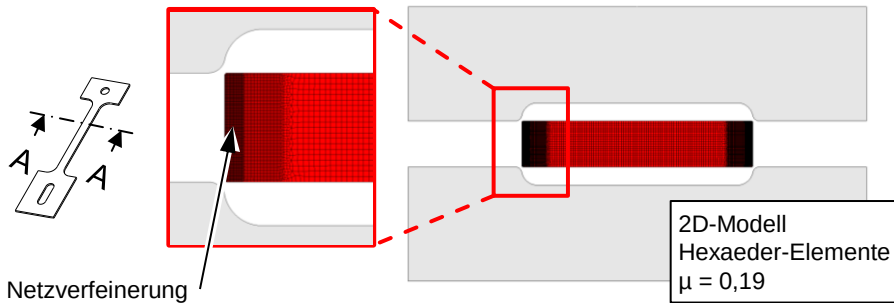


Bild 29: 2D-Modell des Kantenprägeprozesses

Es werden Hexaederelemente mit einer Ausgangselementgröße von 0,05 mm und einer Kantenlänge von 0,006 mm in den verfeinerten Bereichen eingesetzt. Zur weiteren Vereinfachung der Modelle und Verkürzung der Berechnungsdauer wurden die Werkzeuge als starr angenommen, da der Werkzeugstahl eine wesentlich höhere Steifigkeit als die Werkstückwerkstoffe aufweist und nur eine lokale Umformung der Kantenbereiche stattfindet.

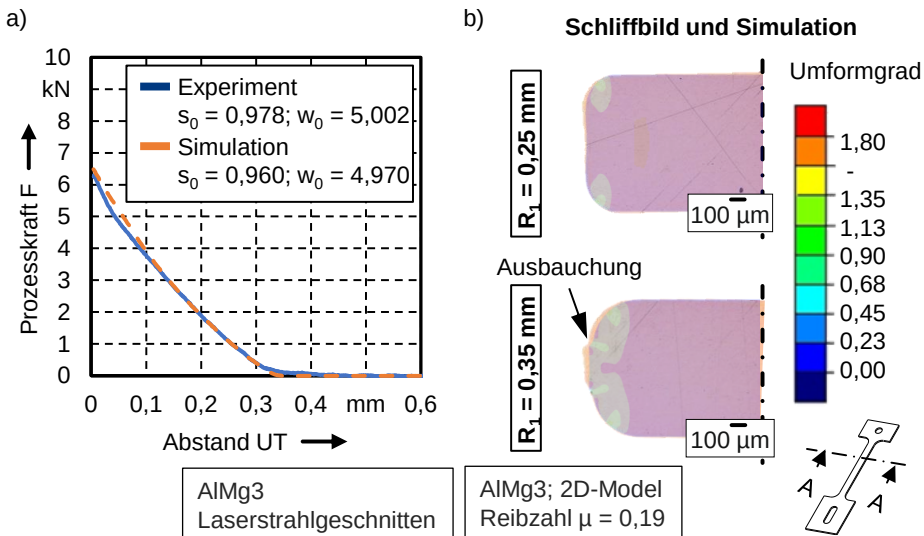


Bild 30: Vergleich von Experiment und Simulation des Kantenprägeprozesses anhand a) der Prozesskräfte und b) geometrischer Merkmale

Die Prozesskraftverläufe von Experiment und Simulation in Bild 30 a) weisen eine hohe Deckung auf. Gleichzeitig wird auch eine gute geometrische Übereinstimmung der Simulationsergebnisse erreicht, wie in Bild 30 b) anhand der vergleichenden Darstellung von Schlibfbildern und Simulationsergebnissen nachgewiesen wird. Das Modell ist somit für die Analyse des Kantenprägeprozesses geeignet.

5.2.2 Nutenprägen

Die Strukturierung der Einleger erfolgt durch das Einprägen mehrerer paralleler Nuten, welche entsprechend Bild 31 a) symmetrisch sowohl auf der Ober- als auch auf der Unterseite eingebracht werden. Im Hinblick auf die kunststofftechnische Weiterverarbeitung für mediendichte Kunststoff-Metall-Verbunde ist die funktionsorientierte Herstellung von Strukturierungen von Bedeutung. Daher werden im Rahmen dieser Arbeit der Einfluss der Prägegeometrie in Form der Nutbreite und Prägetiefe auf die resultierende Strukturierung untersucht. Die grundlegenden Wirkmechanismen des Nutprägens werden in Kapitel 7 behandelt. In diesem Abschnitt wird der Prägeprozess und dessen Auslegung analysiert.

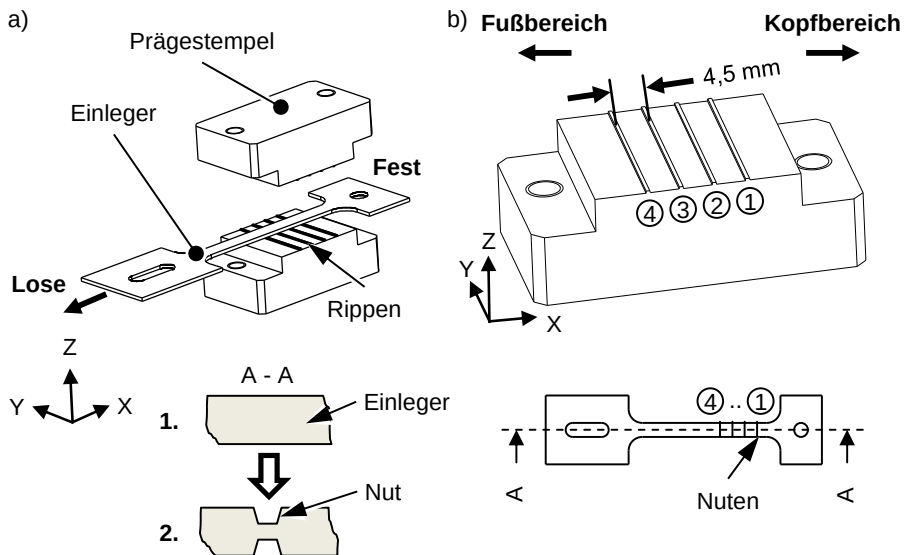


Bild 31: a) Nutprägeprozess und b) Anordnung der Nuten auf dem Stempel

Da das Nutprägen im Hinblick auf die Integration in ein Folgeverbundwerkzeug konzipiert wurde, wurde das Einprägen als offener Prägeprozess gewählt, um die Umformung nur auf das strukturierende Werkstückvolu-

men zu konzentrieren und somit die Prozesskräfte gering zu halten. Hierfür wurden Prägestempel mit vier Rippen vorgesehen. Um eine gegenseitige Beeinflussung beim Einprägen der Nuten gering zu halten, wurde, wie in Bild 31 b) dargestellt, ein konstanter Abstand von 4,5 mm der Rippenmitten festgelegt. Durch das Einprägen der Rippen kommt es zu einem axialen Werkstofffluss in Richtung der Längsachse des Einlegers. Daraus resultiert eine Längung des gesamten Einlegers, weshalb dies als globaler Werkstofffluss kategorisiert wird. Außerdem tritt ein lateraler Werkstofffluss auf, welcher zu einer Breitung des Einlegers im Bereich der Nuten führt, was örtlich begrenzte Änderungen der Ausgangsform bewirkt und daher als lokaler Werkstofffluss klassifiziert wird. Im Weiteren werden sowohl Rippen als auch geprägte Nuten mit der in Bild 31 b) dargestellten Nummerierung ausgehend vom Kopfbereich des Einlegers bezeichnet. Die vier Rippen sind so gewählt, dass die beiden inneren Rippen 2 und 3 von den äußeren Rippen 1 und 4 umschlossen werden. Ohne Berücksichtigung weiterer Randbedingungen würde es sich theoretisch um eine symmetrische Anordnung in x-Richtung mit jeweils einseitiger freier Längung an den äußeren Rippen handeln. Da jedoch der Einleger im Kopfbereich fest ist und keine Längung erlaubt, wohingegen eine freie Dehnung durch das Langloch möglich ist, ergeben sich unterschiedliche Bedingungen für Nut 1 und 4. Daraus folgt, dass mit dieser Anordnung vier unterschiedliche Rahmenbedingungen mit unterschiedlich starken Restriktionen hinsichtlich der Längsdehnung abgebildet werden.

- Nut 1: Die Längung in positiver x-Richtung ist durch die Fixierung mit einem Zentrierstift und in negativer x-Richtung durch die weiteren Nuten eingeschränkt.
- Nut 2: Die Nut ist direkt von weiteren Nuten umgeben, welche die Längung einschränken. In positive x-Richtung trägt Nut 1 sowie die Fixierung des Einlegers bei und in die andere Richtung wird die Längung durch zwei Nuten beeinflusst.
- Nut 3: Die Längung in positiver x-Richtung ist durch zwei Nuten und die Fixierung eingeschränkt. In die negative x-Richtung wird diese nur durch die Nut 4 gehindert.
- Nut 4: In positiver x-Richtung reihen sich drei Nuten sowie die Fixierung des Einlegers, während in negativer x-Richtung keine Restriktion vorhanden und somit eine freie Längung möglich ist.

In der vorliegenden Anordnung hat Nut 2 zu beiden Seiten die stärksten Einschränkungen. Ist davon auszugehen, dass bei einer Anordnung mit weiteren benachbarten Nuten nur ein geringer Effekt hinsichtlich der Restriktionen bezüglich der Längung zu erwarten ist. Daher wird Nut 2 als

Referenz zur Bewertung des Prägeprozesses herangezogen. Die Basis der Untersuchungen der Einflüsse beim Nutprägen bildet die Herstellung theoretisch ideal rechteckiger Nutquerschnitte. Daher wurde die Grundform der Rippen rechteckig angelegt mit unterschiedlichen Breiten und gleicher Höhe, so dass die Nuttiefe weggeregelt variiert werden kann. Die maximale Rippenhöhe beträgt $h_R = 0,30$ mm. Die Breite ist entsprechend Tabelle 7 abgestuft. Die Breiten wurden so gewählt, dass diese die Größenordnung der Blechdicke, der halben Blechdicke und die um eine Größenklasse skaliert abbilden.

Tabelle 7: Basisparameter der Rippengeometrie

Parameter	Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3
Rippenbreite b_R in mm	0,05	0,50	0,90
Rippenhöhe h_R in mm	0,30		
Aspektverhältnis h_R/b_R	6	0,6	0,33

Daraus ergeben sich unterschiedliche Aspektverhältnisse der Rippengeometrie. Wie zuvor beschrieben, liegen unterschiedliche Restriktionen in Abhängigkeit der Nutposition vor. Aufgrund der zu erwartenden Längung des Bauteils durch das Prägen, ist von einer Querbelastung der Rippen auszugehen. Diese ist insbesondere bei schmalen Rippen mit großem Aspektverhältnis bei der Prozessauslegung zu berücksichtigen.

Eine wesentliche Herausforderung für numerische Prozessauslegung des Nutenprägens ist der Umstand, dass die Abmessungen des Einlegers und die der Mikrogeometrie unterschiedliche Größenordnungen haben. Daraus resultiert ein Zielkonflikt, da einerseits der Bedarf besteht die Mikrogeometrie mit einem möglichst feinen Netz anzunähern und andererseits eine große Anzahl an Elementen zu sehr langen Berechnungsdauern und unter Umständen zu instabilen Modellen führt.

Um dieser Herausforderung zu begegnen, wurde ein Simulationskonzept erarbeitet mit dem Ziel, sowohl die wesentlichen Merkmale des axialen und lateralen Werkstoffflusses mit hinreichender Abbildungsgenauigkeit abzubilden als auch moderaten Rechenzeiten zu gewährleisten. Daher wurden für die Prozessauslegung und die nachfolgende Analyse zwei Simulationsmodelle konzipiert. Zum einen wird ein 2D-Modell der Längsebene des Einlegers eingesetzt, welches alle vier Rippen umfasst und somit die Wechselwirkungen des axialen Werkstoffflusses der einzelnen Strukturen abbildet. Zum andere wird ein 3D-Modell einer Nut verwendet, um den dreidimensionalen Stofffluss in Querrichtung zu analysieren. Dadurch ist es

möglich, eine lokal hohe Auflösung mit kleinen Elementgrößen zu erreichen und gleichzeitig die Elementanzahl zu begrenzen, um eine stabile Berechnung mit vertretbaren Rechenzeiten sicherzustellen.

Dem 2D-Modell in Bild 32 a) liegt die Annahme eines ebenen Formänderungszustands in der Längsebene zugrunde. Diese Annahme beruht auf der Ähnlichkeit zum Flachstauchversuch, für den bei einem Verhältnis von Probenbreite zu Blechdicke von 6 eine dominierende ebene Formänderung vorliegt. Mit $s_0 = 1$ mm und einer Breite von 5 mm liegt das Breite-Dicken-Verhältnis bei 5 für die untersuchten Einleger, was näherungsweise dieser Anforderung entspricht. Für das Modell werden Hexaederelemente verwendet mit einer Ausgangselementgröße von 0,040 mm und einer Kantenlänge von 0,005 mm in den verfeinerten Bereichen.

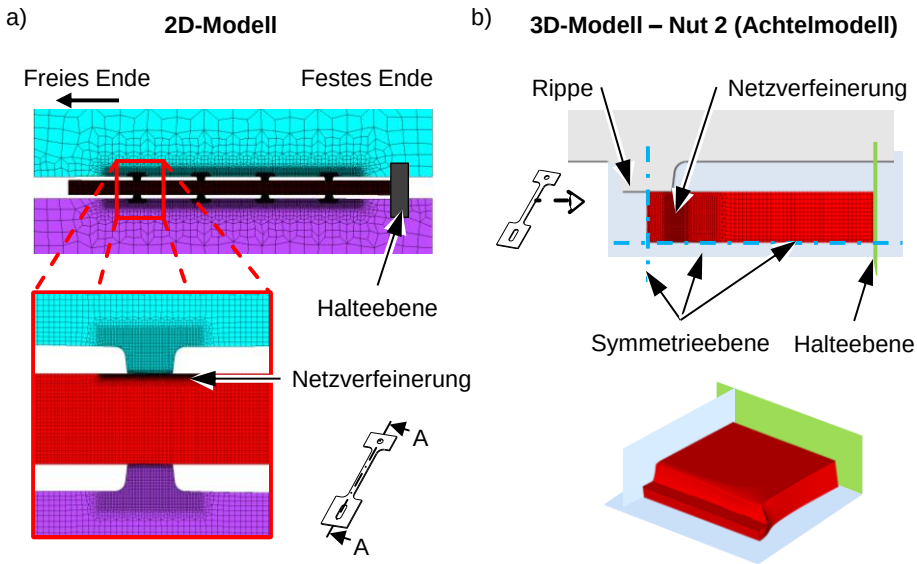


Bild 32: a) 2D-Modell und b) 3D-Modell des Nutprägens

Wie zuvor beschrieben, kann festgestellt werden, dass bei Nut 2 beidseitig starke Restriktionen vorliegen, weshalb für die Modellierung eine Vereinfachung durch die Annahme symmetrischer Bedingungen wie in Bild 32 b) getroffen wird. Durch Symmetrieebenen in der Mitte der Blechebene, in der Längsebene und in der Rippenmitte wird das Modell auf einen Achtel-ausschnitt reduziert. Mit einer Halterebeine wird das Werkstück im Raum fixiert. Dadurch kann das simulierte Bauteilvolumen stark gesenkt werden. Somit ist es möglich, mit vertretbarem Rechenaufwand eine hohe Auflö-

sung durch kleine Elementgrößen zu erreichen. Auf Basis einer Ausgangsgröße der Hexaederelemente von 0,04 mm erfolgt eine Netzverfeinerung im Auftreffbereich der Rippenkante auf eine Elementgröße von 0,01 mm. Da der Prozess vollständig symmetrisch modelliert ist, treten keine ungleichmäßigen Querbelastungen des Stempels auf, daher wird dieser als starrer Körper definiert.

Die Validierung des 2D-Modells erfolgt anhand des Vergleichs der Prozesskraft in Bild 33 a). Es ist eine gute Übereinstimmung des Kraftverlaufs des Modells und der experimentellen Daten zu erkennen. Die charakteristische Änderung der Steigung zunächst beim zunehmend flächigen Kontakt wird erfasst. Darüber hinaus kann durch den Abgleich der simulierten Kaltverfestigung und der gemessenen Härteverteilung Bild 33 b) eine qualitativ gute Deckung der umgeformten Bereiche festgestellt werden. Auch quantitativ wird eine hohe Ähnlichkeit auf Basis der relativen Darstellung erreicht. Aufgrund der höheren lokalen Auflösung der Simulation im Vergleich der Messung ergibt sich eine stärkere Differenzierung der Wertebereiche. Anhand dieser Ergebnisse ist das 2D-Simulationsmodell geeignet für die Prozessauslegung und -analyse.

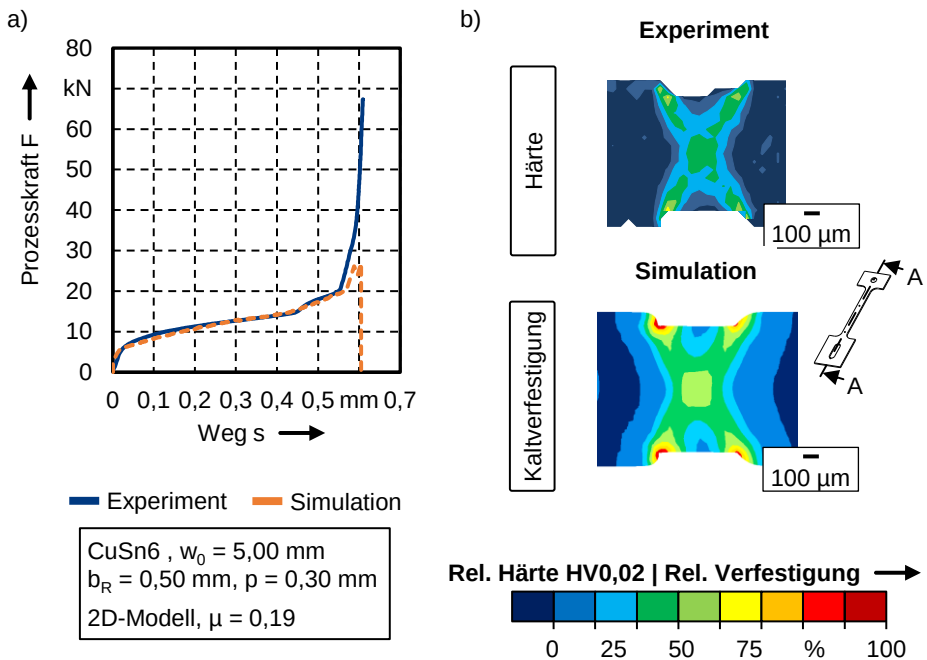


Bild 33: Vergleich von Experiment und Simulation des Nutprägens anhand a) der Prozesskraft und b) der Härte- und Festigkeitsverteilung

Aufgrund der Modellierung nur einer Nut für das 3D-Modell mit den Bedingungen von Nut 2 werden Wechselwirkungen zwischen den Nuten durch einen Werkstofffluss in Längsrichtung des Einlegers vernachlässigt. In Bild 34 wird die Simulation anhand qualitativer Merkmale mit dem Experiment verglichen. Der charakteristische Kanteneinfall in Bild 34 a), der im Randbereich der Probe auftritt, wird mittels des 3D-Modells gut abgebildet. Darüber hinaus wird eine gute Übereinstimmung für die charakteristische Aufdickung in Bild 34 b) durch die Simulation erreicht. Damit ist die Voraussetzung für die numerische Analyse des Werkstoffflusses gegeben. Anhand der Untersuchungen kann gezeigt werden, dass ein zweistufiges Simulationskonzept für die Abbildung des Nutprägens geeignet ist. Dadurch ist es möglich, die wesentlichen Prozesscharakteristika bzgl. des axialen und lateralen Werkstoffflusses zu erfassen.

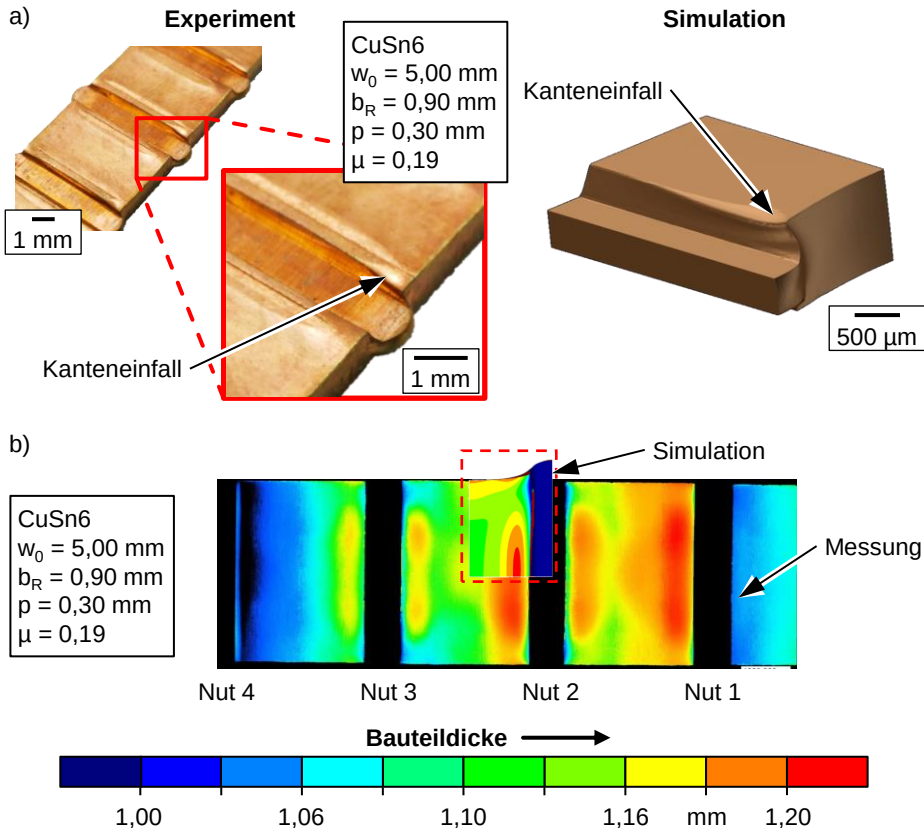


Bild 34: Vergleich von Simulation und Experiment anhand a) charakteristischer Merkmale und b) der Blechdickenverteilung

Mittels der Prozesssimulation mit elastischen Werkzeugen wird deutlich, dass gemäß Bild 35 bei symmetrischer Druckbelastung wie bei Rippe 2 die Spannungen im Werkzeug unterhalb der Streckgrenze von ca. 2807 N/mm^2 von gehärtetem Schnellarbeitsstahl 1.3343 [163] liegen. Mit zunehmenden axialen Werkstofffluss und der ungleichen Belastung an Rippe 4 durch die freie Längung tritt eine starke Querkraft auf. Diese führt zu einer hohen Biegebelastung der Rippe, insbesondere im Zusammenhang mit dem großen Aspektverhältnis von 6 für eine Rippenbreite von $0,05 \text{ mm}$. Wie in Bild 35 a) erkennbar ist, folgt bei einem rein rechteckigen Rippenquerschnitt bereits eine deutliche Verformung der Rippe 4 für das im Vergleich zu CuSn6 weniger feste AlMg3. Aufgrund der Hebelwirkung kommt es zur Spannungskonzentration im Fußbereich von Rippe 4. Hierbei treten für das Biegen charakteristische Zug- und Druckspannungen auf. Anhand der Simulationsergebnisse wird mit Spannungen über 3000 N/mm^2 die Streckgrenze des Werkzeugwerkstoffs überschritten, was somit zum Werkzeugversagen führt. Durch das Vorsehen eines Flankenwinkels von 7° in Verbindung mit einem Übergangsradius von $0,12 \text{ mm}$ in Bild 35 b) erfolgt eine Stabilisierung der Rippe gegen Verformung. Darüber hinaus führt die Kombination der beiden Maßnahmen zu einer Reduzierung der lokalen Spannungen. Dennoch liegt der höchstbelastete Bereich im Rippenfuß.

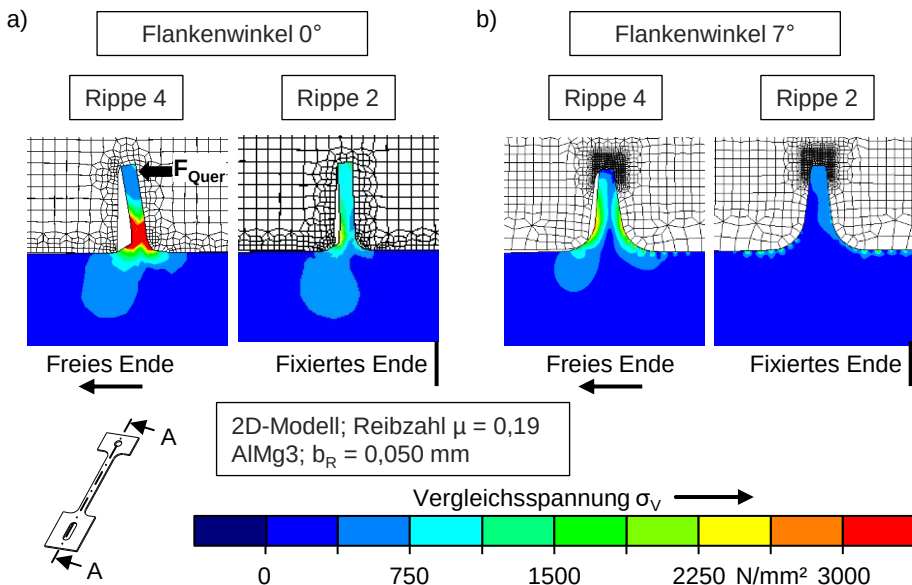


Bild 35: Simulationsergebnisse der Werkzeugbelastung bei einer Rippenbreite von $0,05 \text{ mm}$ a) ohne Flankenwinkel und b) mit Flankenwinkel 7°

Daraus leitet sich die finale Form der Prägegeometrie der Stempel ab, wie in Bild 36 schematisch dargestellt ist. Durch die Flankenwinkel nähert sich die rechteckige Grundform einer Trapezform an. Der Flankenwinkel wurde für die unterschiedlichen Geometrievarianten beibehalten, um die Vergleichbarkeit zu sichern.

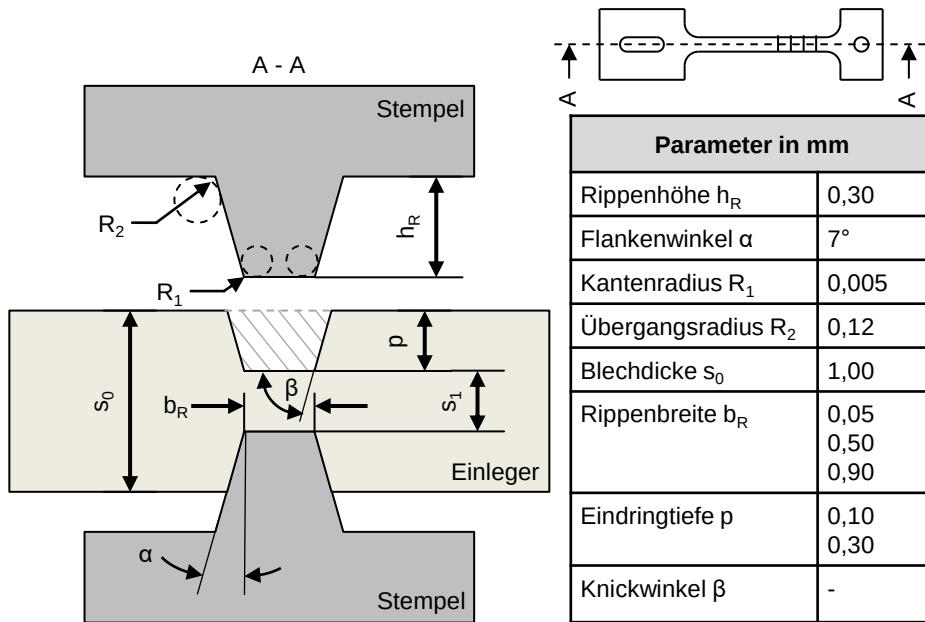


Bild 36: Schnittdarstellung mit Kenngrößen des Nutprägeprozesses

Die Beschreibung der unterschiedlichen Geometrien erfolgt anhand der Breite der Rippen bzw. der Nutbreite im Nutgrund. Die Rippenhöhe h_R ist für die unterschiedlichen Prägestempel gleich, die Eindringtiefe wird wiederum weggeregelt über die Presse eingestellt. In den Untersuchungen wurde die Prägetiefe in den Stufen 0,10 mm und 0,30 mm variiert. Infolge der Fertigung der Rippengeometrie mittels Drahterodieren ergibt sich ein Übergangsradius von 0,12 mm. Die Außenkanten sich scharfkantig mit einem minimalen Kantenradius von 0,005 mm ausgeführt.

Zur Analyse der Werkzeugbeanspruchung sind in Bild 37 die maximalen Hauptspannungen für die versagenskritischste Prozesskonfiguration, bestehend aus schmalen Rippen mit $b_R = 0,05$ mm und CuSn6 als dem festeren der beiden Werkstoffe, aufgetragen. Wie zuvor dargelegt, erfährt die außenliegende Rippe 4 durch die Querkkräfte infolge der freien Längung die stärkste Beanspruchung, daher nur diese stellvertretend als höchstbelastete Rippe dargestellt. Es geht daraus hervor, dass in Bild 37 a) für CuSn6

bereits bei einer Eindringtiefe von 0,100 mm Zugbeanspruchungen bis zu 1763 N/mm^2 im Rippenfuß auftreten. Dies entspricht einem Sicherheitsfaktor gegen Fließen von 1,5, was den üblichen Sicherheiten von 1,2 – 2 [164] entspricht. Mit weiterem Eindringen von 0,015 mm liegen Zugspannungen bis zu 2592 N/mm^2 vor, was knapp unter der Streckgrenze von ca. 2807 N/mm^2 von gehärtetem Schnellarbeitsstahl 1.3343 [163] liegt. Somit ergibt sich nur ein Sicherheitsfaktor von 1 gegen Fließen, was als unzureichend zu bewerten ist. Anhand dessen leitet sich als Grenzwert für die Werkzeugbelastung ein Aspektverhältnis von Eindringtiefe und Rippenbreite von 2:1 ab.

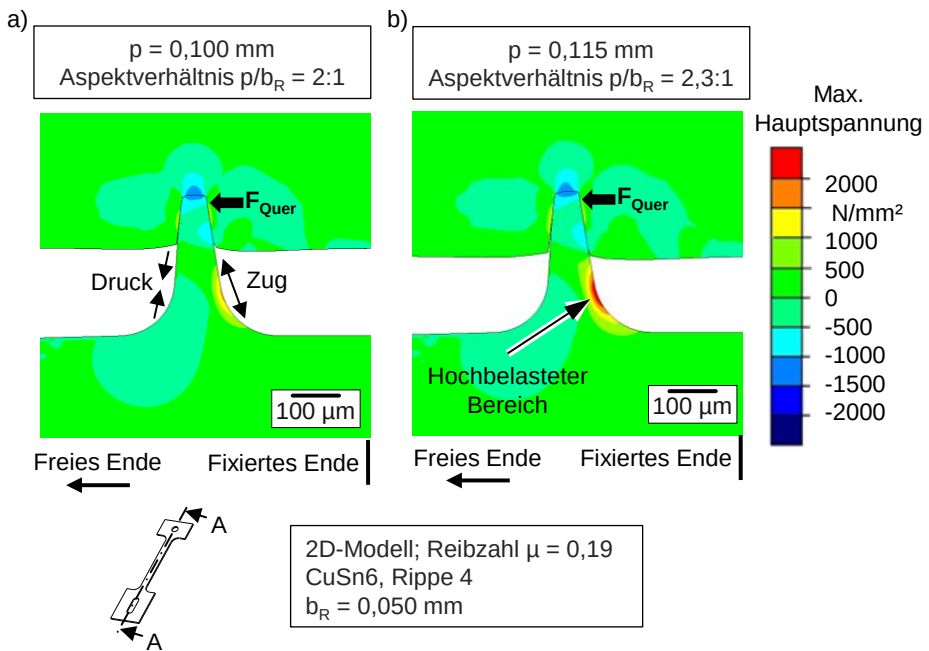


Bild 37: Maximale Hauptspannung an Rippe 4 für die Rippenbreite $b_R = 0,050$ bei einer Eindringtiefe a) $p = 0,100 \text{ mm}$ und b) $p = 0,115 \text{ mm}$

5.3 Modulares Folgeverbundwerkzeug

Im Hinblick auf eine effiziente Herstellung metallischer Einleger in großer Stückzahl ist der Einsatz eines Folgeverbundwerkzeugs prädestiniert. Es können mehrere Einzeloperationen verkettet in einem Werkzeugkonzept zusammengefasst und gleiche Bauteile automatisiert in kurzer Taktzeit gefertigt werden. In dem erarbeiteten Werkzeugkonzept werden die vorge-

stellten Einzelprozesse zusammengefasst. In der Regel sind Folgeverbundwerkzeuge für ein spezifisches Bauteil konzipiert. Änderungen der Bauteilgeometrie sind nachträglich oftmals nicht möglich oder mit hohen Werkzeugkosten verbunden. Gerade für Forschungszwecke ist jedoch die Untersuchung der Einzelprozesse sowie die vielfältige Variation von Parametern und Bauteilgeometrien von Interesse. Daraus ergeben sich folgende Anforderungen an das Werkzeugkonzept:

- Variation der Bauteilgeometrie: Die Herstellung einer Vielzahl an Varianten (siehe Anhang) mit Stegbreiten zwischen 2,5 mm und 7,5 mm, unterschiedlicher Anzahl an Stegen sowie variierendem Abstand zweier Stege soll möglich sein.
- Kosteneffiziente Adaption: Eine kostengünstige Werkzeugadaption soll sichergestellt werden, um eine ökonomische Einlegerfertigung bei kleinen Stückzahlen zu ermöglichen.
- Analyse der Einzelprozesse: Für die Analyse der Einzelprozesse ist eine gute Zugänglichkeit gefordert. Daher sollen einzelne Werkzeugmodule auf einer Universalprüfmaschine betrieben werden können.
- Automatisierte Fertigung auf einer Schnelldrückerpresse: Um reale Prozessbedingungen abzubilden, soll das Werkzeug vollautomatisch in einer Schnelldrückerpresse eingesetzt werden.
- Geringe Bauteiltoleranzen: Es müssen geringe Form- und Maßtoleranzen erreicht werden, um eine reibungslose Weiterverarbeitung in einer vollautomatischen Spritzgießzelle zu gewährleisten.

Auf Basis des Streifenbildes und der Prozessanordnung sowie der gelisteten Anforderungen wurde ein modulares Werkzeugkonzept erarbeitet und umgesetzt. Dies zeichnet sich dadurch aus, dass es in drei unabhängige Werkzeugmodule aufgeteilt ist, welche separat betrieben werden können. Die Module sind so angelegt, dass diese sowohl einzeln in einer Universalprüfmaschine als auch im Verbund in der Schnelldrückerpresse betrieben werden können. Innerhalb der Module können weitere Anpassungen der Aktivteile erfolgen, um so unterschiedliche Einlegergeometrie fertigen und strukturieren zu können. Um eine kosteneffiziente Anpassung des Werkzeugs zu ermöglichen, wurden die Werkzeugmodule so konzipiert, dass zu einem hohen Grad standardisierte Normalien eingesetzt wurden. Dies begünstigt sowohl eine geringe Fertigungsdauer als auch eine kosteneffiziente Umsetzung.

Die Operationen, welche im Folgeverbundwerkzeug umgesetzt wurden, teilen sich in Scherschneidoperationen zur Erzeugung der Sucherlöcher und der Einlegergeometrie, in Prägeoperationen zu Kantenverrundung

und Strukturierung und in das Abschneiden und somit Vereinzeln der Einleger. Als Prozessreihenfolge wurde festgelegt, dass zunächst die Einlegergeometrie bis zum Steg freigeschnitten wird. Die anschließenden Prägeoperationen für das Kantenverrunden und das Strukturieren erfolgen somit nur am Steg. Konzepte, bei denen zunächst in den vollen Blechstreifen kontinuierlich Nuten geprägt werden und dann erst der Einleger freigeschnitten wird, wurden verworfen. Gründe hierfür waren einerseits, dass Umformarbeit auf Bereiche aufgewendet wird, welche im weiteren Verlauf als Schnittabfall enden, und andererseits erhöht sich der Kraftbedarf in den ersten Stufen und der Kraftschwerpunkt würde damit stark außermittig verschoben werden. Dies sollte im Hinblick auf Querkkräfte und erhöhte Belastung der Führungen vermieden werden.

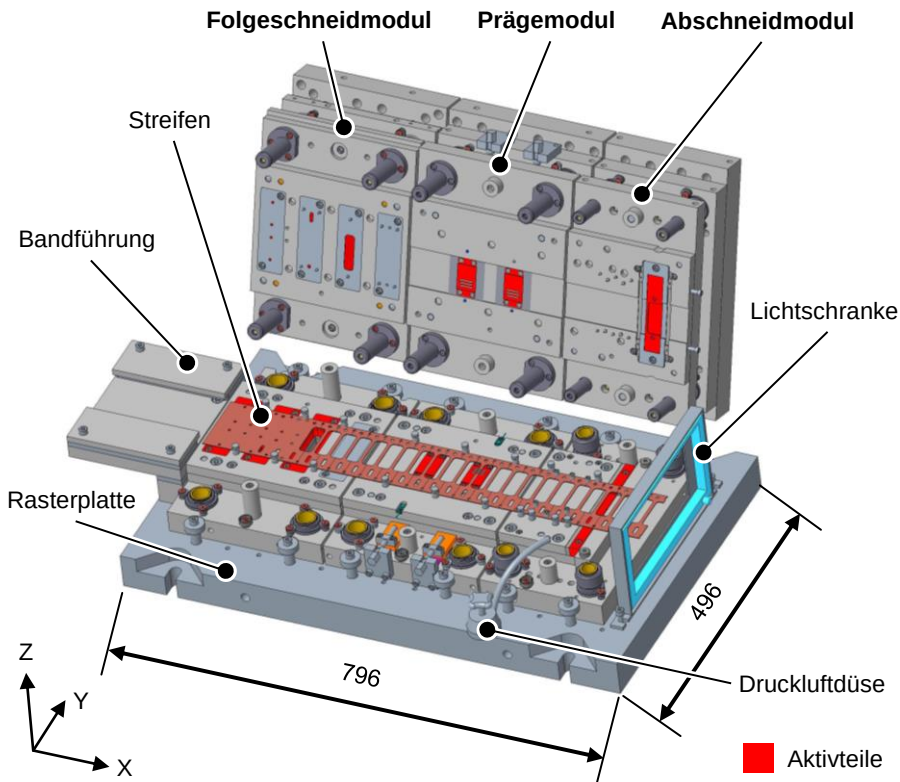


Bild 38: Modulares Folgeverbundwerkzeug

Aus der genannten Gruppierung der Operationen wurde die in Bild 38 dargestellte Einteilung in drei Werkzeugmodule abgeleitet. Hierbei ist das Streifenbild der Einlegergeometrie in einem Folgeschneidmodul zusammengefasst. Die Prägeoperationen sind in einem Prägemodul umgesetzt

und das Vereinzeln ist in einem separaten Abschneidmodul angelegt. Durch diese Einteilung ist es möglich, das Werkzeug nur mit Folgeschneid- und Abschneidmodul zu betreiben, wie in Bild 39 zu sehen. Diese Konfiguration wurde im Rahmen der Arbeit genutzt, um gezielt den Prägeprozess mit einem zugänglichen Versuchswerkzeug mittels einer Universalprüfmaschine zu untersuchen. Dadurch konnte der Prägeprozess separiert und unabhängig von anderen Einflüssen analysiert werden.

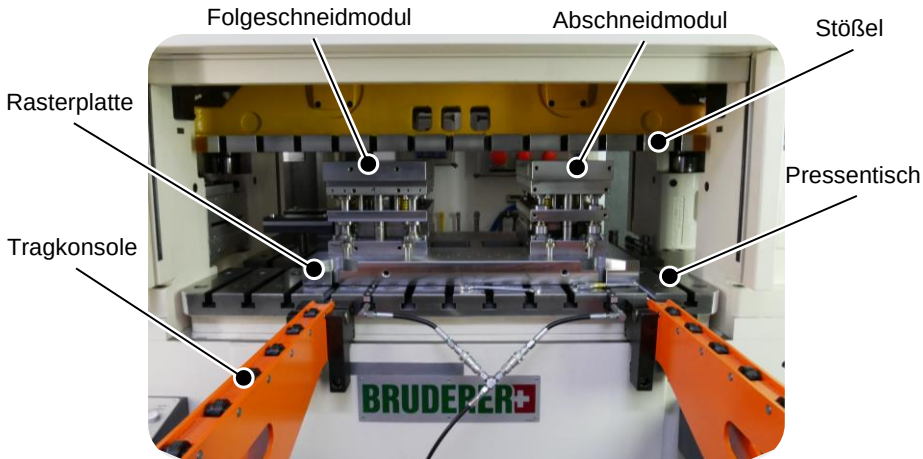


Bild 39: Modulares Folgeverbundwerkzeug mit Konfiguration zum Scherschneiden von Einlegern

Für alle Module wurden Präzisionsführungsgestelle in Plattenbauweise eingesetzt, welche dadurch gekennzeichnet sind, dass dies eine Führungsplatte haben, in welcher die Führungssäulen befestigt sind. Da somit die Säulenaufnahmeplatte in der Gestellmitte liegt, reduziert sich die Hebel-länge bei Querkräften um die Hälfte, wodurch sich die Säulendurchbiegung auf 12,5 % reduziert im Vergleich zu einer Anordnung mit der Säulenaufnahme in einer der beiden Aufspannplatten [165]. Alle Gestelle sind von der Firma Meusburger Georg GmbH & Co KG und basieren auf derselben Systematik, was die Modularisierung des Gesamtwerkzeugs vereinfacht. Da die einzelnen Werkzeugmodule mit vollwertigen Führungsgestellen ausgestattet sind, wurde von dem Konzept eines Muttergestells, welches die Führungsfunktion übernimmt, abgesehen und stattdessen eine Rasterplatte entworfen, auf welcher die Module zueinander angeordnet werden. Die Rasterplatte in Bild 40 hat ein regelmäßiges Lochraster, über welches mittels Passstiften die Werkzeugmodule exakt positioniert werden. Hierfür sind in den Werkzeugmodulen präzise drahterodierte halb offen auf H7 to-

lerierte Bohrungen eingebracht, dadurch können die Module einfach aufgeschoben und entsprechend Bild 40 b) an die Passstifte angelegt werden, was das Ausrichten beim Rüsten erleichtert. Die korrekte Werkzeuganlage wird über eine Absteckereinheit an der Werkzeughinterseite gemäß Bild 40 a) sichergestellt. Anschließend wird das Werkzeugmodul mittels vier Klemmpilzen festgespannt. Die Rasterplatte hat mehrere Durchbrüche, so dass die Abfälle der Schneidoperationen über den geteilten Pressentisch abgeführt werden können. Für die Schneidkonfiguration aus Folgeschneid- und Abschnidmodul ergibt sich ein Kraftschwerpunkt bezogen auf die Mitte des Pressentischs von $-125,24$ mm in Längsrichtung und $-1,51$ mm in Querrichtung, was eine exzentrische Belastung der Presse bis 350 kN erlaubt. Das Prägemodul ist daher mittig im Folgeverbund platziert, um eine zentrumsnahe Krafteinleitung sicherzustellen.

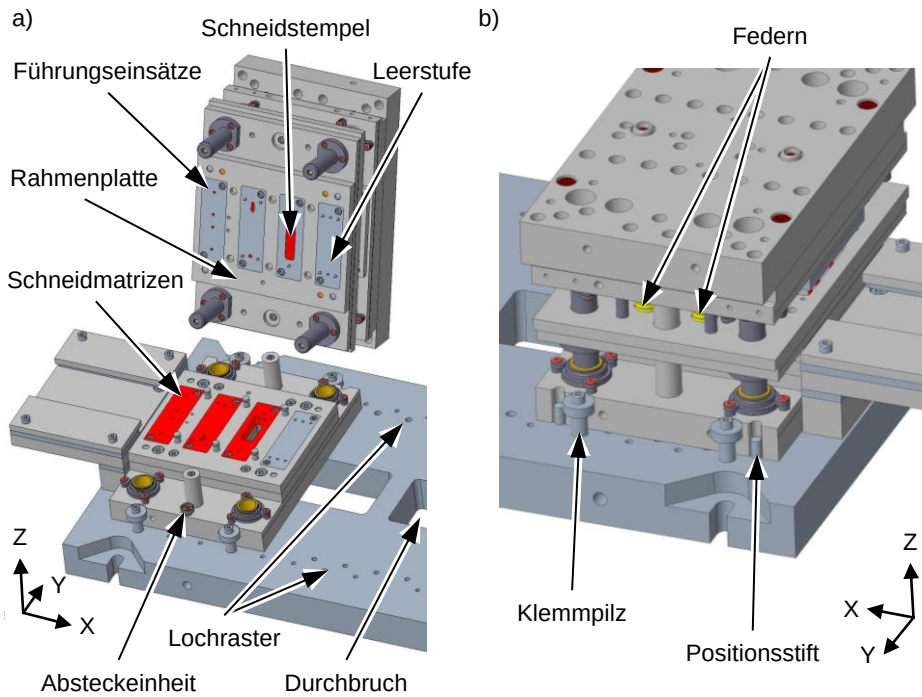


Bild 40: a) Folgeschneidmodul und b) Rückansicht mit Positioniersystem

Um eine Werkzeugadaption zu ermöglichen, ist das Folgeschneidmodul variabel aufgebaut und die Schneidaktivteile sowie die zugehörigen Führungselemente als austauschbar Einsätze konzipiert. Basis hierfür sind präzise drahterodierte Rahmenplatten, in welche die Einsätze platziert und verschraubt werden. Die Schneidstempel werden über die Führungseinsätze in der Führungsplatte positioniert und geführt. Diese sind ansons-

ten in der Stempelhalteplatte des Oberwerkzeugs nur verschraubt, um Zwangslagen zu vermeiden. Durch die Führung nahe der Blechebene wird eine hohe Präzision sichergestellt und der Einfluss durch Querkkräfte auf die Stempel minimiert. Die Schneidmatrizen haben einen senkrechten Schneidkantenbereich von 4 mm, an den ein konischer Bereich mit einem Öffnungswinkel von 1° anschließt, wodurch ein Nachschleifen der Matrizen möglich ist. Die Führungsplatte ist über Federn gegenüber der Stempelhalteplatte vorgespannt. Die Vorspannung entspricht der initialen Niederhalterkraft von 3,82 kN und wird beim Aufsetzen der Führungsplatte auf den Blechstreifen aufgebracht.

Die Schneidmatrizen und Schneidstempel sind aus dem Kaltarbeitsstahl 1.2379 und auf 60 HRC gehärtet. Dieser zeichnet sich durch eine hohe Druckfestigkeit und gute Zähigkeit aus. Zusätzlich sind die Schneidaktivteile mit einer verschleißfesten 3 μm -Schicht aus Titannitrid (TiN) beschichtet, da kein zusätzlicher Schmierstoff während des Schneidprozesses eingesetzt wird. Die Streifenführung und das Abheben während des Vorschubs wird von federnden Stiften mit Führungsnut übernommen. Exakte Positionierung während der Schneidoperation wird mittels Sucherstiften erreicht, welche in die geschnittenen Sucherlöcher eintauchen. Um die genaue relative Lage von Schnittgeometrie zur Sucherposition sicherzustellen, sind die Sucherstifte ebenfalls über die Führungseinsätze positioniert. Durch den Tausch der Einsätze kann die Einlegergeometrie kostengünstig variiert werden, es muss lediglich ein Satz aus Schneidmatrize, Stempel und Führungseinsatz getauscht werden. Mit der zusätzlichen Leerstufe ist darüber hinaus eine weitere Schneidoperation integrierbar.

Im Prägemodul sind entsprechend Bild 41 a) zwei Prägeoperationen integriert, zum einen zum Kantenverrunden, zum anderen zum Nutenprägen. Diese sind symmetrisch zu Modulmitte angeordnet und im Aufbau gleich, so dass diese in der Reihenfolge getauscht werden können. Um die Prägeoperationen adaptieren zu können, wurden die Prägewerkzeug mehrteilig konzipiert und gliedern sich in einen Stempelhalter und einen Prägestempel. Der Stempelhalter bildet den Grundkörper, auf den der Prägestempel aufgeschraubt wird. Dadurch muss nur ein geringer Teil eine Geometrievariation neu gefertigt werden, was eine werkstoffeffiziente Werkzeugadaption ermöglicht. Die Prägetiefe an Ober- und Unterseite kann über Keilschieber am Werkzeug eingestellt werden. Dies dient sowohl der Abstimmung des Prägeprozesses auf die anderen Werkzeugmodule und erlaubt eine gezielte Variation der Prägetiefe ohne zusätzliche Prägewerkzeuge. Die Keilschieber in Bild 41 b) haben eine Steigung von 2° , was bei einem Stellweg von 10 mm einer Höhenvariation von etwa 0,35 mm entspricht,

womit die untersuchten Prägtiefen abgebildet werden können. Sowohl in Ober- als auch in Unterwerkzeug sind Aussparungen gefräst, so dass der geprägte Bereich des Stegs nicht klemmt oder verformt wird.

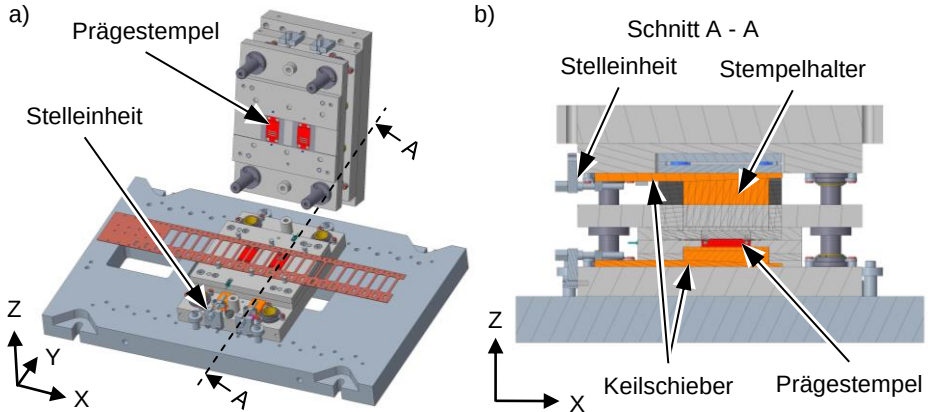


Bild 41: a) Prägemodul und b) Schnittdarstellung durch eine Prägeoperation [166]

Das Abschneidmodul in Bild 42 dient zur Vereinzelung der Einleger. Gemäß dem Streifenbild wird eine abfallfreie Abschneidoperation vorgesehen. Dies ist mit zwei wesentlichen Herausforderungen verbunden. Zum einen muss beim Abschneiden das Moment aufgenommen werden, da es sonst zu einer starken Verformung der Schnittkante kommt, zum anderen variiert die Gratlage zwischen dem rechten dem linken Schnittufer.

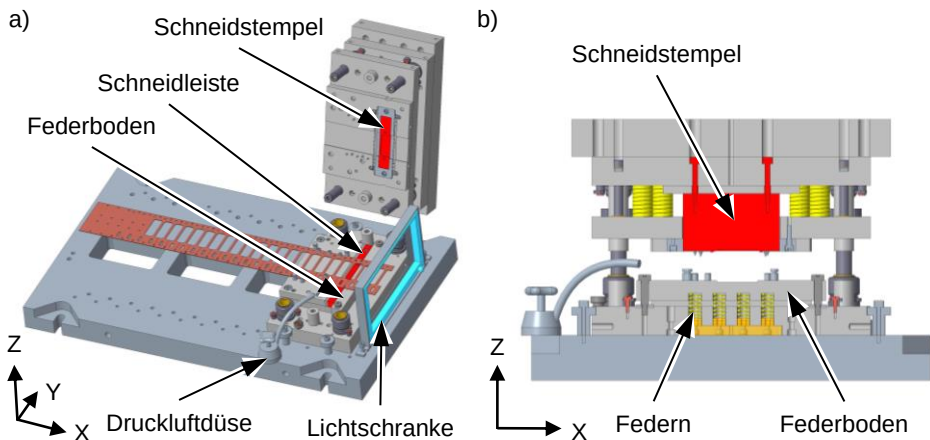


Bild 42: a) Abschneidmodul und b) Schnittdarstellung durch den Schneidstempel

Während beim Lochen die Geometrie durch den Stempel und beim Ausschneiden durch die Matrize bestimmt werden und diese entsprechend auf

das Nennmaß abgestimmt werden, variiert die maßbestimmende Werkzeugkomponente beim Abschneiden zwischen den beiden Schnittufern. Um die Lage von Steg und Löchern zentrisch zum Kopf- und Fußbereich zu halten, wurde die Schnittlinie um die halbe Schneidspaltbreite von 0,025 mm verschoben. Daher wurde für die genaue Abstimmung von Schneidleiste und Schneidstempel zusätzliche Abstimmleisten konzipiert. Über deren Breite kann sowohl die Position von Stempel und Schneidleiste als auch die Position der Schnittlinie justiert werden. Das Abknicken der Einleger beim Abschneiden wird durch den Einsatz eines Federbodens verhindert. Wie in Bild 42 b) dargestellt, ist dieser unterhalb des Schneidstempels angeordnet und bewegt sich während des Schneidprozesses nach unten und nimmt das Moment infolge des Scherschneidens auf. Da durch den Federboden keine Teileabfuhr nach unten möglich ist, werden die abgeschnittenen Einleger mittels zweier Druckluftdüsen aus dem Werkzeug geblasen. Um den korrekten Auswurf der Teile aus dem Werkzeug sicherzustellen, wird dies mittels einer Lichtschranke überwacht. Erst nachdem der Einleger durch die Lichtschranke gefallen ist und ein Signalwechsel registriert wurde, wird der nächste Hub freigegeben. Wie im Prägemodul sind auch hier Aussparungen in das Werkzeug eingebracht, um die geprägten Bereiche der Einleger nicht zu beschädigen.

5.4 Zusammenfassende Erkenntnisse

Entsprechend der Prozessfolge im Folgeverbund wurden die einzelnen Operationen bestehend aus Scherschneiden, Kantenprägen und Nutprägen definiert und ausgelegt. Anhand von Scherschneidversuchen unter Variation des Schneidspalts wurde die resultierende Schnittkantengeometrie für AlMg3 und CuSn6 analysiert. Es wurde grundsätzlich für den Werkstoff CuSn6 ein größerer Glattschnittanteil als bei AlMg3 festgestellt, was durch die 10 % höhere Duktilität von CuSn6 begründet werden kann. Ein Einfluss durch die Schneidgeschwindigkeit im Bereich zwischen 50 mm/min und 8400 mm/min ist nicht festzustellen. Ein bezogener Schneidspalt von 5 % wurde auf Basis der Untersuchungen als geeignet für das Scherschneiden im Folgeverbundprozess abgeleitet, da für beide Werkstoffe eine reproduzierbare Schnittkantengeometrie mit hohem Glattschnittanteil und definierter Bruchzone gefertigt werden kann.

Der Kantenprägeprozess wurde so ausgelegt, dass auch Einleger an der oberen Breitentoleranzgrenze einlegt werden können. Als kleinster Kantenradius wurde $R_1 = 0,25 \text{ mm}$ gewählt, um selbst bei schergeschnittenen

Bauteilen noch die Kanten am Übergang von Kanteneinzug und Glattschnittbereich umzuformen. Für die numerische Prozessanalyse wurde ein 2D-Modell eingeführt und anhand von Prozesskräften und geometrischen Merkmalen validiert. Es konnte eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation nachgewiesen werden.

Für die Analyse des Nutprägeprozesses wurde ein zweistufiges Simulationskonzept erarbeitet, um den Zielkonflikt auf hoher lokaler Auflösung und vertretbarer Berechnungsdauern zu lösen. Dieses basiert einerseits auf einem 2D-Modell des gesamten Einlegers unter Annahme eines ebenen Formänderungszustands. Damit ist es möglich, den axialen Werkstofffluss und die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Nuten zu untersuchen. Andererseits wurde ein 3D-Modell einer Nut erstellt, um den dreiaxigen Spannungs- und Dehnungszustand infolge des lateralen Werkstoffflusses im Randbereich abzubilden. Hierzu wurden Symmetrieebenen in allen drei Raumrichtungen genutzt, um die Modellgröße und somit die Berechnungsdauer klein zu halten. Beide Modelle wurden anhand experimenteller Daten mit guter Übereinstimmung validiert und die Eignung für die Prozessanalyse nachgewiesen. Hinsichtlich der Werkzeugauslegung beim Nutprägen wurden Querkkräfte infolge des axialen Werkstoffflusses, insbesondere bei schmalen rechteckigen Rippen, als limitierenden Faktor identifiziert. Durch die Biegebelastung kommt es zu versagenskritischen Spannungen im Fußbereich der Rippe. Zur Stabilisation wurde daher ein Flankenwinkel von 7° an den Rippen der Prägestempel vorgesehen. Als kritisches Aspektverhältnis aus Eindringtiefe und Rippenbreite wurde das Verhältnis 2:1 für CuSn6, den festeren der beiden Werkstoffe, abgeleitet.

Aufbauend auf der Auslegung der Einzelprozesse wurde ein modulares Folgeverbundwerkzeug konzipiert und umgesetzt. Dieses gliedert sich in drei separate Module, in welchen die Schneid- und Prägeprozesse separat zusammengefasst sind. Die Module können sowohl einzeln in einer Universalprüfmaschine als auch im Verbund in einer Schnellläuferpresse betrieben werden. Damit wird das Werkzeug der Anforderung der gezielten Untersuchung der Einzelprozesse und der industrienahen, automatischen Produktion gerecht. Dadurch sind die Grundlagen für die gezielte Untersuchung der Prägeprozesse zum Kantenverrunden und zur Strukturierung der Einleger geschaffen.

6 Grundlegende Analyse des umformtechnischen Kantenverrundens mittels Prägen

Vor dem Hintergrund eines wachsenden Bedarfs mediendichter Kunststoff-Metall-Hybridbauteile ist das Umspritzen metallischer Einleger im Montagespritzguss ein hoch produktives Verfahren, insbesondere bei großen Stückzahlen. Alternativ zu zeitaufwendigen Zusatzprozessen, wie das Aufbringen von Haftvermittler oder ein Zwei-Komponenten-Spritzguss, besteht großes Potential zu Verbesserung der Dichtheit durch die gezielte Gestaltung des metallischen Einlegers. Ein Aspekt ist das Verrunden scharfer Kanten. Das umformtechnische Kantenverrunden zeichnet sich durch eine einfache Integrierbarkeit in einen Folgeverbundprozess und die hohe Produktivität aus. Im Zusammenhang der Prozessauslegung bestehen zentrale Fragestellungen zum Kraftbedarf, zum Einfluss des Eckradius auf die Einlegergeometrie sowie zu den Auswirkungen von Toleranzschwankungen der Einleger. Die Toleranzschwankungen beziehen sich auf die Einlegerbreite und die Blechdicke. Die Einlegerbreite ist durch die Anforderungen des Dichtkonzepts des Umspritzprozesses mit $\pm 0,03$ mm festgelegt. Aus den Produktnormen für Bandmaterial ist für AlMg3 eine Dickenschwankung von $\pm 0,04$ mm vorgegeben. Für CuSn6 ist diese mit $\pm 0,03$ mm etwas geringer. Somit ergeben sich aus den geometrischen Halbzeugspezifikationen werkstoffspezifische Unterschiede. Außerdem sind die Einflüsse durch den Werkstoff und den vorgelagerten Schneidprozess hinsichtlich der charakteristischen Schnittkantengeometrien zu bewerten. Die Untersuchung des Kantenverrundens basiert auf einem kombinierten experimentell numerischen Ansatz. Anhand dessen wird auf Basis experimenteller Ergebnisse das Simulationsmodell abgeglichen und gezielte Einflüsse in der Simulation modelliert, um deren Auswirkung auf den Prozess zu analysieren. Zunächst wird anhand des idealisierten rechteckigen Einlegerquerschnitts der Prozess des Kantenverrundens beurteilt. Augenmerk liegt hierbei neben der resultierenden Kantengeometrie auf der Ausbildung der Umformzone. Aufbauend darauf werden die Untersuchungen um die Aspekte der Bauteiltoleranzen und die Beeinflussung durch vorgelagerte Schneidprozesse erweitert. Anhand der erarbeiteten Erkenntnisse werden geeignete Prozessführungsstrategien abgeleitet, um Toleranzschwankungen zu kompensieren und die Prozessstabilität sicherzustellen.

6.1 Umformzone beim Kantenprägen

In diesem Abschnitt werden die grundlegende Prozesscharakteristik des Kantenprägens und die daraus resultierenden Eigenschaftsänderungen analysiert. Hierfür werden sowohl experimentelle als auch simulative Ergebnisse miteinander verglichen. Zur Darstellung der zugrundeliegenden Zusammenhänge und zur Separierung von einzelnen Einflussfaktoren wird das in Abschnitt 5.2.1 vorgestellte Simulationsmodell verwendet.

Zunächst wird der Prägeprozess exemplarisch für AlMg3 anhand eines ideal rechteckigen Einlegerquerschnitts vorgestellt, der dem Nennmaß für Breite von 5 mm und der Dicke von 1 mm entspricht. Um eine rechteckige Querschnittsform experimentell abzubilden, werden laserstrahlgeschnittene Proben verwendet. Der weggebundene Prozess ist so angelegt, dass im UT der Abstand der Kavitäten a , stets 1 mm beträgt und somit der Nenndicke der Einleger entspricht. Aufgrund der Symmetrie des Prozesses wird nachfolgend exemplarisch nur eine Seite dargestellt. Der Prozessablauf beginnt mit dem Positionieren des Einlegers über der Mitte der Kavität. Zur Führung und Zentrierung ist daher der Übergangsradius R_2 vorgesehen. Anschließend werden durch die Abwärtsbewegung des oberen Stempels die Werkzeuge zusammengefahren. Es kommt zunächst zum Kontakt an den Kanten des Einlegers und dem Oberwerkzeug. Sobald die Kanten auch das Unterwerkzeug berühren, erfolgt die Krafteinleitung wie in Bild 43 über die lokalen Kontaktbereiche. Infolgedessen konzentriert sich die Umformung auf die Kantenbereiche. Mit Erreichen des UT ist der Umformprozess abgeschlossen und es besteht für Einleger mit Nenndicke ein vollflächiger Kontakt. Abschließend wird der obere Stempel abgehoben und der Einleger aus der Kavität gehoben.

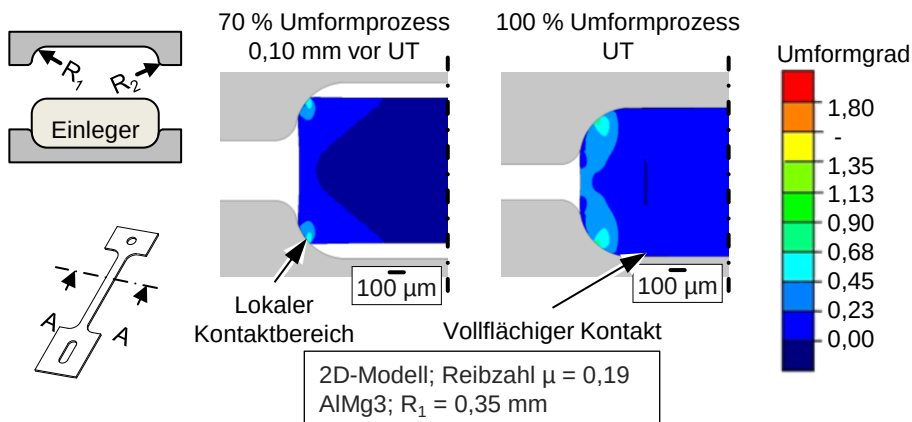


Bild 43: Prozessablauf und Kontaktbereiche beim Kantenprägen

In Bild 44 b) sind die Ergebnisse der Simulation vergleichend mit Schliffbildern von laserstrahlgeschnittenen Proben aus AlMg3 für die experimentell untersuchten Eckradien R_1 von 0,25 mm und 0,35 mm dargestellt. Hieran wird die gute geometrische Übereinstimmung zwischen Simulation und Experiment deutlich. Anhand der Simulationsergebnisse ist zu erkennen, dass sich Umformzone für $R_1 = 0,25$ mm lokal auf den Kantenbereich konzentriert. Im Gegensatz hierzu kommt es für $R_1 = 0,35$ mm neben der starken Umformung im lokalen Kontaktbereich der Kanten zu einer erkennbaren Plastifizierung im Randbereich über die gesamte Blechdicke. Wie in Bild 44 a) dargestellt, verringert sich mit größerem Eckradius der Querschnitt der Kavität. Folglich wird während der Umformung mehr Werkstoff verdrängt und größere Bereiche umgeformt. Wie in Bild 44 b) zu erkennen ist, wird der Werkstoff in die Kontur der Kavitäten und in den verbleibenden Spalt verdrängt, was mit einer Zunahme der Breite verbunden ist. Aus den Simulationsergebnissen leitet sich für $R_1 = 0,25$ mm eine Breite von 5,044 mm ab und für $R_1 = 0,35$ mm führt die Umformung zu einer Einlegerbreite von 5,078 mm. Der Unterschied ergibt sich aus der geringeren Querschnittsfläche der Kavität für $R_1 = 0,35$ mm, wodurch mehr Werkstoff in verbleibenden Spalt fließt.

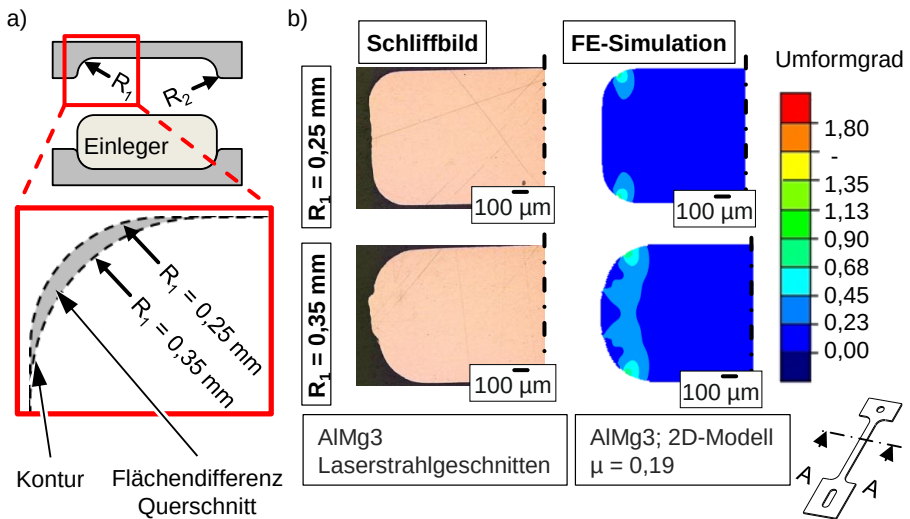


Bild 44: a) Schematische Darstellung der Änderung der Querschnittsfläche und b) Auswirkung auf den Umformbereich [35]

Der Effekt des Kantenprägens ist anhand des Übergangs zwischen ursprünglicher und verrundeter Einlegerkante erkennbar. In Bild 45 sind konfokalen Aufnahme der Einlegerkanten für unterschiedliche Radien und

in Abhängigkeit des Werkstoffs und des Schneidverfahrens zusammengefasst. Für die Aufnahmen wurden die Proben um 45° geneigt, wodurch die Kante dem höchsten Punkt der Aufnahme entspricht. Zur leichten Zuordnung wurden die Proben entsprechend der Lage im Umformprozess orientiert. Daran wird deutlich, wie der Prägeprozess zur Reduktion scharfer Kanten beiträgt. Für die laserstrahlgeschnittenen Proben ergibt sich eine gleichmäßige Ausformung des Kantenradius. Für die schergeschnittenen Varianten beeinflusst die charakteristische Schnittkantengeometrie in Form des Einzugs die Abbildung des geprägten Radius. Während sich für die laserstrahlgeschnittenen Proben eine symmetrische Ausbreitung der umgeformten Bereiche in die Oberseite und die Seitenfläche zeigen, verschiebt sich diese bei schergeschnittenen Einleger. Dies geht auf die Formabweichung durch den Kanteneinzug zurück. Durch die werkstoffspezifische Ausbildung der Schnittkante ergeben sich Unterschiede bzgl. der resultierenden Kantenverrundung auch für die beiden Werkstoffe.

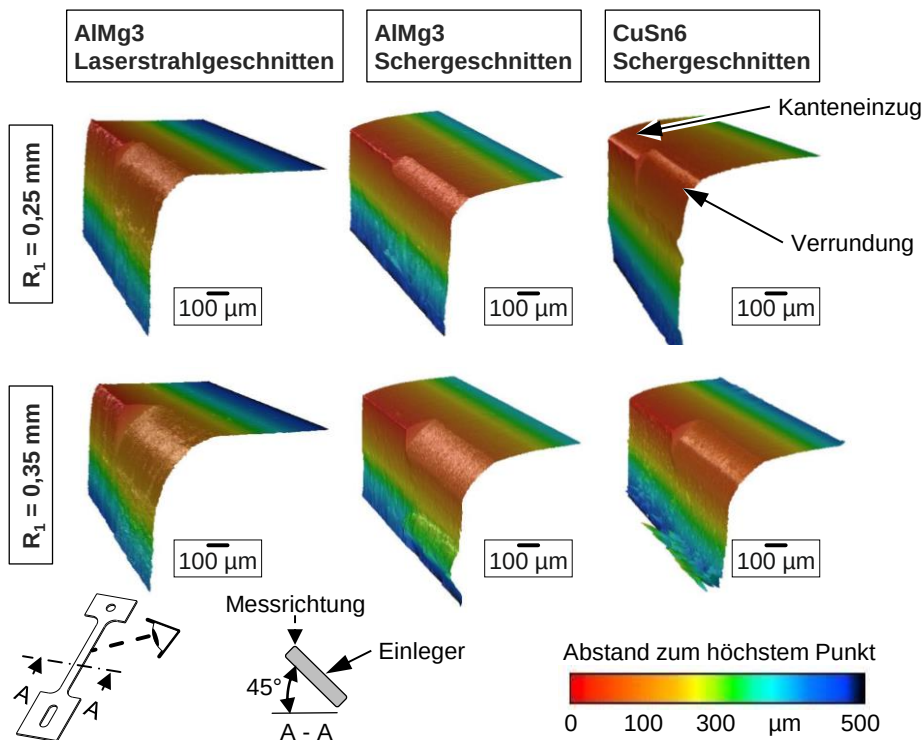


Bild 45: Konfokale Aufnahmen des Übergangs der Einlegerkante vor und nach dem Kantenprägen

In Bild 46 ist die Prozesskraft über den Abstand zu UT aufgetragen, da es sich um einen weggebundenen Prozess handelt und die Lage des UT gleich bleibt und dieser somit einen konstanten Bezugspunkt darstellt. Während des Prozesses bewegt sich der Stempel zusammen mit dem Werkstück zunächst kraftfrei nach unten, bis es zum Kontakt zwischen Werkstück und Unterwerkzeug kommt und die Krafteinleitung über die lokalen Kontaktflächen wie in Bild 43 erfolgt. Daran schließt sich ein kontinuierlicher Kraftanstieg durch die Umformung und damit einhergehende Kaltverfestigung an. Kurz vor UT kommt es dann zu einem sprunghaften Anstieg der Prozesskraft. Der vollflächige Kontakt an dieser Stelle führt zu einer stark vergrößerten Kontaktfläche zur Krafteinleitung, wodurch sich bei gleichbleibender Fließspannung der Kraftbedarf proportional zur Kontaktfläche erhöht. Da sich die Krafteinleitung und die Umformung lokal konzentrieren, ist der Kraftbedarf für die eigentliche Kantenverrundung gering. Zum Zeitpunkt des steilen Kraftanstiegs ist die Kantenverrundung im Wesentlichen bereits abgeschlossen. Der vollflächige Kontakt hingegen ist mit unnötig hohem Kraftbedarf verbunden, dies kann zu einer Stauchung des Einlegers und infolge der hohen Kräfte zu einer elastischen Deformation der Werkzeuge führen. Im Sinne einer effizienten Prozessgestaltung und adäquaten Pressengröße ist somit ein vollflächiger Kontakt beim Kantenprägen zu vermeiden.

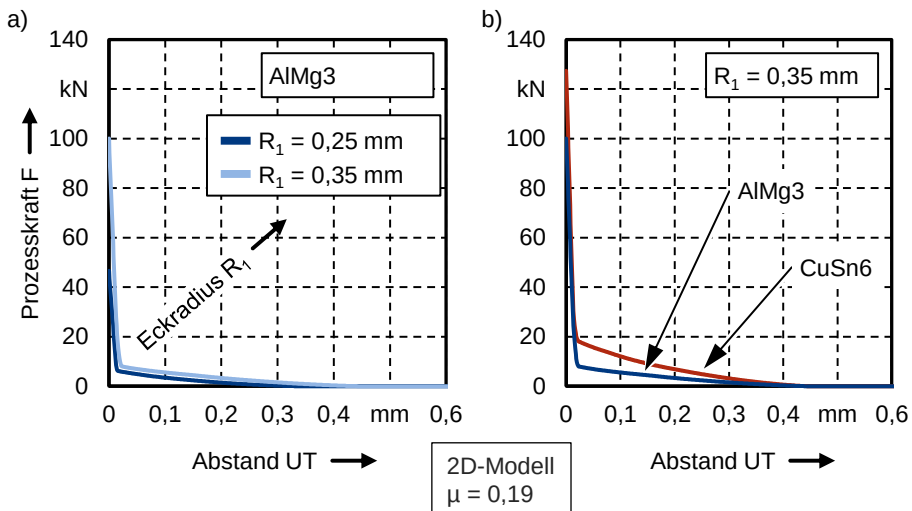


Bild 46: Prozesskräfte beim Kantenprägen eines rechteckigen Bauteilquerschnitts in Abhängigkeit von a) Eckradius und b) Werkstoff

Wie zuvor beschrieben, reduziert sich der Querschnitt der Kavität mit größerem Eckradius. Infolgedessen wird mehr Werkstoff umgeformt, was in Bild 46 a) durch die höheren Prozesskräfte zu erkennen ist. Gleichzeitig führt ein größerer Eckradius zu einem Werkstückkontakt bei mehr Werkzeugabstand, folglich setzt der Umformprozess bereits bei einem weiteren Abstand zu UT ein. Darüber hinaus tritt die vollständige Formfüllung früher ein, weshalb der steile Kraftanstieg für $R_1 = 0,35 \text{ mm}$ um $0,01 \text{ mm}$ verschoben ist und somit bei größerem Abstand vor UT erfolgt. Beim Vergleich der Prozesskräfte bei konstanten Werkstückabmessungen für verschiedene Werkstoffe in Bild 46 b) sind der Zeitpunkt der beginnenden Kraftzunahme und des steilen Kraftanstiegs an der gleichen Position bezogen auf UT. Die Kraftverläufe der Werkstoffe unterscheiden sich lediglich durch das höhere Kraftniveau bei CuSn6. Dies ist auf die höhere Festigkeit und stärkere Kaltverfestigung zurückzuführen. Anhand dessen kann gezeigt werden, dass die mechanischen Eigenschaften im Rahmen der Untersuchungen einen untergeordneten Einfluss haben bei gleichem Einlegerquerschnitt.

Anhand der Untersuchungen kann gezeigt werden, dass der Eckradius und somit der Querschnitt der Kavität bezogen auf den Einlegerquerschnitt einen starken Einfluss auf die Umformung und die Prozesskraft hat. Darüber hinaus wurde dargelegt, dass der Prägeprozess hinsichtlich der Prozesskräfte sehr sensibel gegenüber dem vollflächigen Kontakt von Werkstück und Prägekontur ist. Im folgenden Abschnitt wird daher speziell auf die Einflüsse auf den Einlegerquerschnitt in Form von Maßtoleranzen und den Scherschneidprozess eingegangen.

6.2 Einflüsse von Maßtoleranzen auf das Kantenprägen

Aufgrund der Sensitivität des Prozesses auf die Formfüllung haben Maßtoleranzen der Einleger einen starken Einfluss auf den Prozess. Bei einer vollständigen Formfüllung äußert sich dieses wie in Abschnitt 6.1 in sehr hohen Prozesskräften. Gleichzeitig werden durch das Prägen kleine geometrische Merkmale umgeformt in Form verrundeter Kanten. Deshalb wird neben einer Überfüllung auch ein Einfluss der Unterfüllung nachfolgend untersucht. Hierfür werden die Auswirkungen der spezifizierten Maßtoleranzen der Einlegerbreite und der Blechdicke analysiert.

Die vorgegebene Breitentoleranz von $w_0 = 5,0 \text{ mm}$ der Einleger ist $\pm 0,03 \text{ mm}$, die Blechdickentoleranz ergibt sich aus den normierten Lieferbedingungen der Werkstoffe. Bei einer Blechdicke $s_0 = 1,00 \text{ mm}$ ist für AlMg3 eine Toleranz von $\pm 0,04 \text{ mm}$ [144] zulässig, während für CuSn6 eine

Dickentoleranz von $\pm 0,03$ mm [148] vorgegeben ist. Aufgrund der unterschiedlichen Toleranzspannen können diese als werkstoffspezifischer Einfluss eingestuft werden. Aufgrund der größeren Toleranzschwankungen von AlMg3 wird exemplarisch hierfür in Bild 47 der Einfluss der Grenzabmessungen in Abhängigkeit des Eckradius auf die Umformzone und die resultierende Geometrie dargestellt. Mittig ist die Formfüllung für das Nennmaß abgebildet, daneben sind die Ergebnisse für die Extremwerte der unteren und oberen Toleranzgrenzen angeordnet. Es ist zu erkennen, dass bei Einlegern im unteren Toleranzbereich bei gleichbleibendem Prozess immer noch eine Verrundung der Kanten stattfindet und somit das Ziel, scharfe Kanten für das nachfolgende Umspritzen zu vermeiden, erreicht wird. Hingegen steht bei Einlegern an der oberen Toleranzgrenze mehr Werkstoffvolumen zu Verfügung, wodurch es zu einer deutlichen Überfüllung der Kavität kommt und verstärkt Werkstoff in den verbleibenden Spalt verdrängt wird, was zur Bildung eines unerwünschten Grats führt. Die Gratbildung wird durch einen zunehmenden Eckradius aufgrund der Reduzierung des Querschnitts der Kavität noch verstärkt. Gleichzeitig kann gezeigt werden, dass selbst im Extremfall die Umformung sich über die gesamte Blechdicke auswirkt, aber sich ausschließlich auf den Randbereich des Einlegers konzentriert.

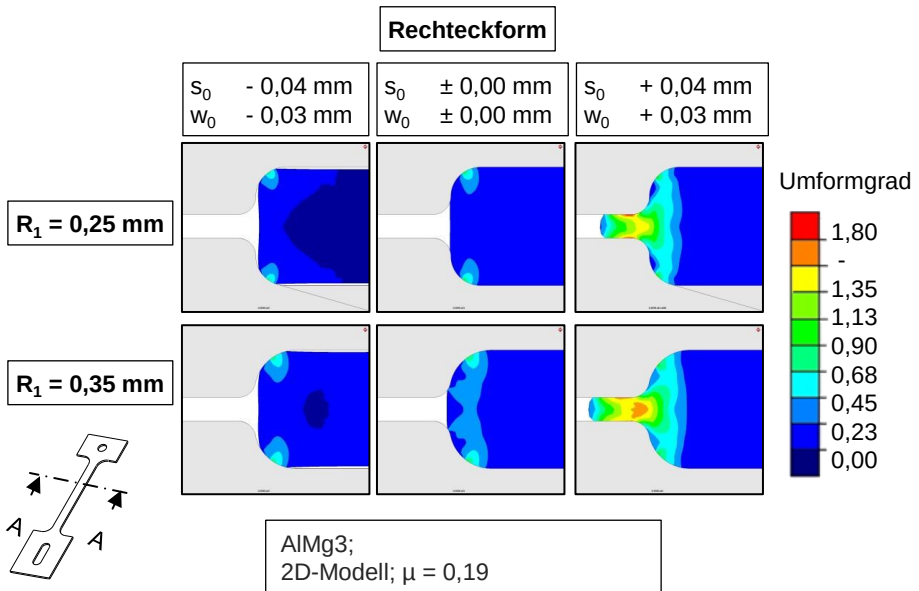


Bild 47: Einfluss der Maßtoleranzen auf das Kantenprägen für AlMg3 [35]

Die Breiten- und Dickentoleranzen beeinflussen in unterschiedlichem Grad das Umformergebnis. Dies ist im Prozesskraftverlauf gut zu erkennen. Um die Einflüsse von Dicke und Breite zu trennen, sind in Bild 48 die Kraftverläufe aufgeteilt nach Breiten- und Dickenvariation exemplarisch für AlMg3 dargestellt. Die Knickstelle des steilen Kraftanstiegs markiert jeweils den Zeitpunkt der vollständigen Formfüllung und dient zur Bewertung der Toleranzeinflüsse. Während in Bild 48 a) die Variation von der Nennbreite in einer Verschiebung der Formfüllung um etwa 0,005 mm bei einem Kraftniveau von etwa 8,5 kN resultiert, wird in Bild 48 b) ein wesentlich stärkerer Einfluss der Dickenvariation deutlich. Die Verschiebung der Formfüllung liegt bei 0,037 mm zwischen der oberen Toleranz + 0,04 mm und dem Nennmaß. Dies ist dem größeren zusätzlichen Volumen geschuldet, welches sich aus dem Produkt der größeren Blechdicke und der Blechbreite zusammensetzt.

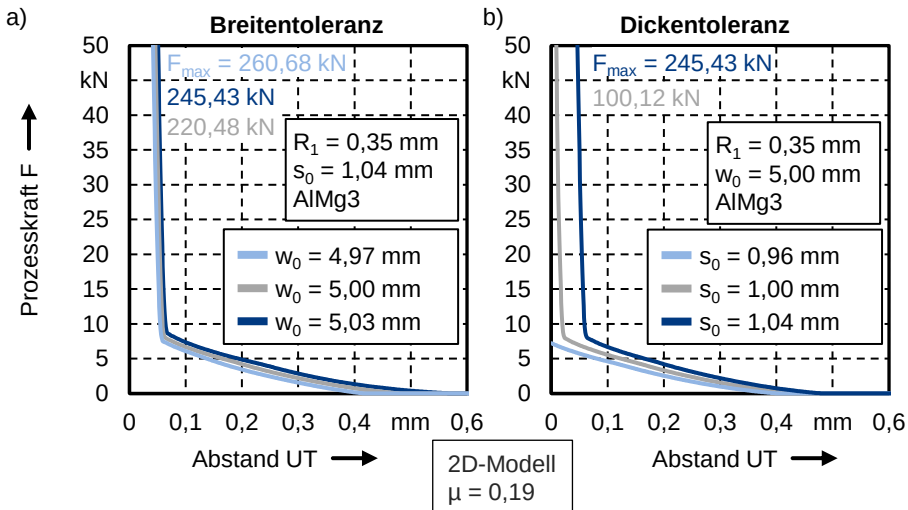


Bild 48: Prozesskräfte beim Kantenprägen eines rechteckigen Bauteilquerschnitts a) bei gleicher Dicke mit Variation der Breite und b) bei gleicher Breite mit Variation der Dicke

Aufgrund des rechteckigen Einlegerquerschnitts besteht ein ungleiches Verhältnis von Breite zu Dicke. Im vorliegenden Fall beträgt das Verhältnis von Breite zu Dicke 5:1, wie in Bild 49 dargestellt ist. Somit führt eine Änderung der Blechdicke zu einer um den Faktor 5 größeren Abweichung der Querschnittsfläche als die gleiche Variation der Einlegerbreite. Beim Vergleich des Einflusses von Breiten- und Dickentoleranz wirkt das Breiten-Dicken-Verhältnis wie ein Verstärkungsfaktor für die Blechdicke.

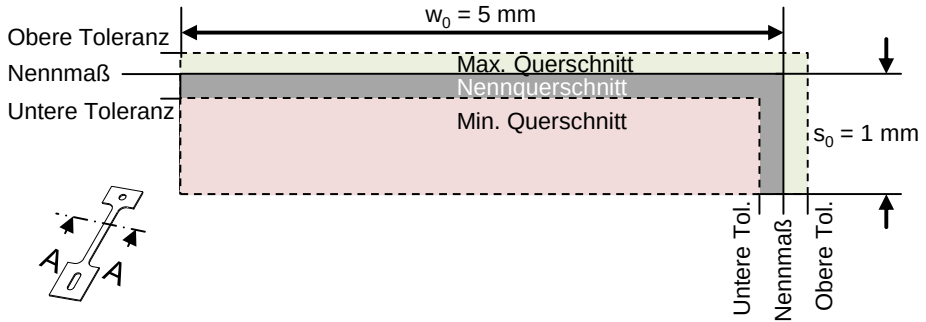


Bild 49: Schematische Darstellung der Variation der Querschnittsfläche des Einlegers

Die Querschnittsänderung der Dickenschwankung skaliert linear mit der Einlegerbreite. Daher bleibt die relative Querschnittsänderung durch die Dickenschwankungen auch beim Kantenprägen mit größerer Einlegerbreite konstant. Um den Einfluss der unterschiedlichen Maßtoleranzen in Abhängigkeit aufzuzeigen, sind diese in Bild 50 als relative Abweichung vom Nennquerschnitt über die Einlegerbreite aufgetragen.

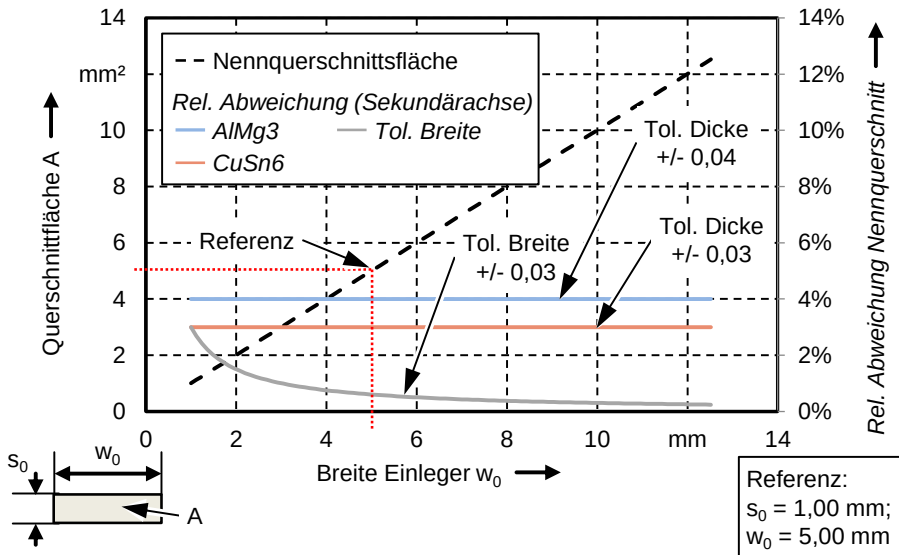


Bild 50: Toleranzeinfluss auf die Querschnittsfläche in Abhängigkeit der Einlegerbreite

Da die Nennblechdicke konstant bei 1 mm liegt, sind die Querschnittsfläche und die Abweichungen über die Einlegerbreite aufgetragen, beginnend mit der Untergrenze $w_0 = s_0$, was üblicherweise die Herstellbarkeitsgrenze mittels Scherschneiden markiert. Die exemplarisch dargestellte Obergrenze orientiert sich an den konzipierten Einlegervarianten, ist jedoch

nicht abschließend festgelegt. Da der Einfluss der Dickentoleranz konstant ist, wird dieser als farbige, waagerechte Gerade dargestellt. Aufgrund der unterschiedlichen Dickentoleranzen für AlMg₃ und CuSn₆ sind zwei Geraden dargestellt. Entsprechend der Toleranzgrenzen bei 1 mm Blechdicke ergibt das 4 % der Querschnittsfläche für AlMg₃ und 3 % für CuSn₆. Hingegen ist die Querschnittsänderung durch die Breitentoleranz unabhängig von der Einlegerbreite und bleibt absolut gesehen gleich. Der Anteil der Querschnittsänderung relativ zum Nennquerschnitt nimmt jedoch mit größerer Einlegerbreite ab. Wie in Bild 50 anhand der grauen Kurve dargestellt, nimmt der Einfluss zunächst stark ab und nähert sich dann asymptotisch der Abszisse an. Da der Kantenprägeprozess weggebunden ist mit fest definiertem UT, folgt daraus, dass bei einer Überfüllung der Kavität aufgrund der größtmöglichen Blechdicke wesentlich mehr Werkstoff verdrängt wird und dieser dann am verbleibenden Spalt austreten muss, was zu einem unerwünschten Gratwachstum beiträgt. Somit reagiert der Prozess zunehmend sensibler hinsichtlich der Gratabbildung durch Dicken-schwankungen mit steigender Einlegerbreite.

Wie bereits in Abschnitt 6.1 dargelegt wurde, ist die Querschnittsfläche ein relevanter Einflussfaktor hinsichtlich der Formfüllung und der Prozesskräfte. Folglich wirken sich Toleranzschwankungen auf das Umformergebnis aus. Anhand der Untersuchungen kann gezeigt werden, dass im Prägeprozess für Einlegerquerschnitte an der unteren Toleranzgrenze noch eine Kantenverrundung erreicht wird, während Querschnitte über dem Nennquerschnitt zu einer Überfüllung und somit zu einer unerwünschten Gratabbildung und hohen Prozesskräften führen. Bei rechteckigem Einlegerquerschnitt reagiert der Prozess sensibler auf Blechdicken- als auf Breiten-schwankungen. Der Grat der Einflussstärke der beiden Toleranzen ändert sich in Abhängigkeit Verhältnisses von Breite zu Dicke. Bei breiteren Einlegern nimmt der Einfluss der Breitentoleranz auf die resultierende Querschnittsfläche ab. Daher folgt aus den Untersuchungen, dass bei der Prozessauslegung des Kantenprägens die Maßtoleranzen in Abhängigkeit des Breiten-Dicken-Verhältnisses des Einlegers berücksichtigt werden müssen. Darüber hinaus muss der Werkstoff beachtet werden, da die normierte Dickentoleranz wiederum in Abhängigkeit des Werkstoffs variiert.

6.3 Einflüsse des Scherschneidens auf das Kantenprägen

Die bisher vorgestellten Ergebnisse basieren auf einem ideal rechteckigen Einlegerquerschnitt. Durch den Fertigungskontext im Folgeverbundwerk-

zeug ist der Querschnitt durch den vorgelagerten Scherschneidprozess beeinflusst. Die charakteristische Schnittkanten geometrie ist mit einer reduzierten Querschnittsfläche aufgrund des Kanteneinzugs und der Bruchzone verbunden. Wie bereits dargelegt, hat der Querschnitt und somit das Bauteilvolumen starken Einfluss auf die Formfüllung und die Endgeometrie nach dem Kantenprägen. Neben der Änderung der Querschnittsfläche kommt es zusätzlich zu Formabweichungen bei schergeschnittenen Einlegern, was sich wiederum auf den Kontaktbereich und somit auf die Umformzone auswirkt. Um den geometrischen Einfluss der Schnittkante zu untersuchen, wurde daher der Einleger mit realer Schnittkante modelliert. Hierzu wurde entsprechend Bild 51 aus Schliffbildern von Scherschneidversuchen die Schnittkanten geometrie abgeleitet und als CAD-Modell in die Simulation eingebunden. Dadurch wird eine hohe Abbildungsgenauigkeit des realen Bauteils sichergestellt. In Bild 51 a) ist die geometrische Abweichung der Schnittkanten von der idealen Geometrie erkennbar.

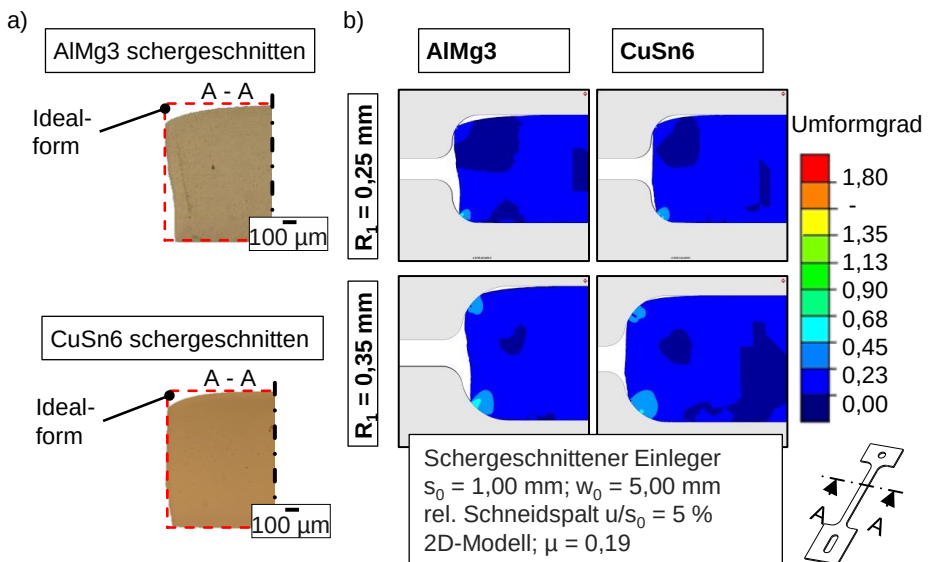


Bild 51: Einfluss der Schnittkanten auf das Kantenprägen [35]

Infolge des Volumenverlusts durch das Scherschneiden kommt es zu einer Unterfüllung der Kavitäten, insbesondere für AlMg3 bei einem Eckradius von 0,25 mm. Hinzu kommt, dass durch den Kanteneinzug beim Scherschneiden es bereits zu einem gewissen Grad der Verrundung kommt, wodurch sich die Umformung an der oberen Kante auf einen sehr kleinen Bereich reduziert und daher in Bild 51 b) kaum zu erkennen ist. Im Gegen-

satz hierzu entsteht an der unteren scharfen Kante im Bereich der Bruchzone eine deutliche Umformzone mit Umformgraden größer 0,23. Gerade für AlMg3 und einen Eckradius von 0,25 mm verbleibt durch die größere Bruchzone und den stärkeren Kanteneinzug ein geometrischer Unterschied der oberen und unteren Kante. Die Querschnittsfläche von AlMg3 $A_{\text{AlMg3}} = 4,876 \text{ mm}^2$ ist um $0,114 \text{ mm}^2$ kleiner als die der Kavität $A_{R1=0,25} = 4,990 \text{ mm}^2$. Im Gegensatz hierzu ist der Unterschied der Querschnittsfläche von CuSn6 $A_{\text{CuSn6}} = 4,930 \text{ mm}^2$ mit $0,060 \text{ mm}^2$ nur noch etwa halb so groß, wodurch eine bessere Ausformung der Eckradien erfolgt. Mit größerem Eckradius wird der Querschnitt der Kavität kleiner, dadurch ergibt sich $A_{R1=0,35} = 4,950 \text{ mm}^2$. Folglich ist die Querschnittsfläche von CuSn6 nur $0,020 \text{ mm}^2$ kleiner als die der Kavität, was somit zu einer nahezu vollständigen Formfüllung mit hoher Abbildungsgenauigkeit gemäß Bild 51 b) führt. Die Werkstoffeigenschaften in Kombination mit dem Scherschneidprozess führen zur Ausbildung unterschiedlicher Schnittkanten geometrien, welche in Bild 52 dargestellt sind. Daraus resultiert ein merklicher Werkstoffeinfluss auf den Kantenprägeprozess in Form des resultierenden Kantenverrundung und der Prozesskräfte.

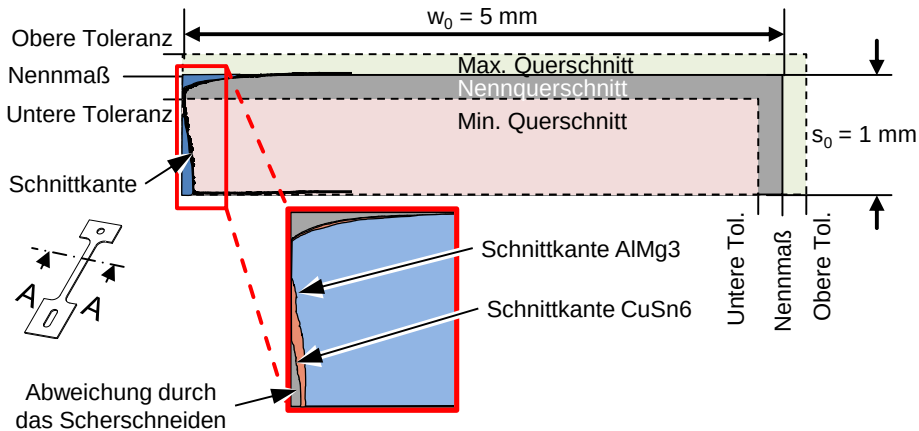


Bild 52: Schematische Darstellung der Variation der Querschnittsfläche schergeschnittener Einleger

Anhand der Prozesskraftverläufe in Bild 53 ist die reduzierte Prozesskraft der schergeschnittenen Einleger im Vergleich zum ideal rechteckigen Einlegerquerschnitt zu erkennen. Hierbei wird jedoch die Kaltverfestigung des Scherschneidprozesses nicht berücksichtigt. Zur Vergleichbarkeit mit den ideal rechteckigen Einlegerquerschnitten wird von unverfestigtem Werkstoff zum Simulationsbeginn ausgegangen. Der höhere Kraftbedarf von CuSn6 bei schergeschnittenen Einlegern ist auf die höhere Festigkeit und

die stärkere Formfüllung zurückzuführen. Bei schergeschnittenen Einlegern aus AlMg3 treten Prozesskräfte von $F_{\max, \text{AlMg3}}(R_i=0,25) = 9,16 \text{ kN}$ und $F_{\max, \text{AlMg3}}(R_i=0,35) = 21,56 \text{ kN}$ auf. Hierbei kommt es zu einer Erhöhung der Prozesskraft um den Faktor 2,35 bei größerem Eckradius. Die Prozesskräfte bei CuSn6 liegen mit $F_{\max, \text{CuSn6}}(R_i=0,25) = 33,82 \text{ kN}$ um das 3,69-fache und mit $F_{\max, \text{CuSn6}}(R_i=0,35) = 53,17 \text{ kN}$ um das 2,47-fache höher als bei AlMg3. Der Unterschied zwischen den beiden Radien ist für CuSn6 mit dem Faktor 1,57 kleiner als bei AlMg3, was auf den höheren Grad der Formfüllung bereits bei $R_i = 0,25 \text{ mm}$ zurückzuführen ist. Gleichzeitig sind die Prozesskräfte bei schergeschnittenen Einlegern weniger als halb so groß wie die ideal rechteckige Einlegergeometrie.

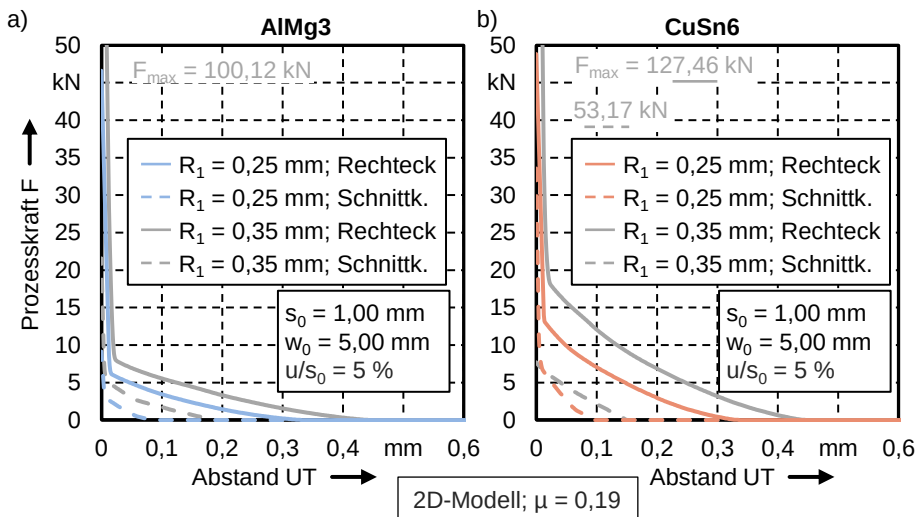


Bild 53: Prozesskräfte beim Kantenprägen eines rechteckigen und schergeschnittenen Bauteilquerschnitts für a) AlMg3 und b) CuSn6

Durch die Abweichung der schergeschnittenen Kanten verändert sich nicht nur der Kraftbedarf, sondern auch der Prozessverlauf, indem sich der Zeitpunkt des Kontakts zwischen Prägestempel und Werkstück in Richtung UT verschiebt. Dies ist in den Prozesskraftverläufen in Bild 53 zu erkennen.

Eine vergleichende Darstellung der Kontaktzeitpunkte in Abhängigkeit des Eckradius ist in Bild 54 abgebildet. Anhand von Bild 54 a) wird der Unterschied in Form des wesentlich späteren Werkzeugkontakts zwischen ideal rechteckigem Querschnitt und schergeschnittenen Einleger deutlich. Es ergibt sich eine Verschiebung des Kontaktzeitpunkts um etwa 0,25 mm für $R_1 = 0,25 \text{ mm}$ und um 0,26 mm für $R_1 = 0,25 \text{ mm}$. Der Unterschied zwischen AlMg3 und CuSn6 ergibt sich aus dem größeren Kanteneinzug der

Aluminiumlegierung. Die Verschiebung des Kontaktzeitpunkts bezogen auf UT verhält sich nach Bild 54 b) nicht linear. Mit zunehmendem Eckradius wird die Verlagerung des Kontaktzeitpunkts kleiner. Daraus folgt, dass über einen größeren Stempelweg eine Umformung stattfindet, was sich in einem höheren Grad der Plastifizierung des Einlegers auswirkt.

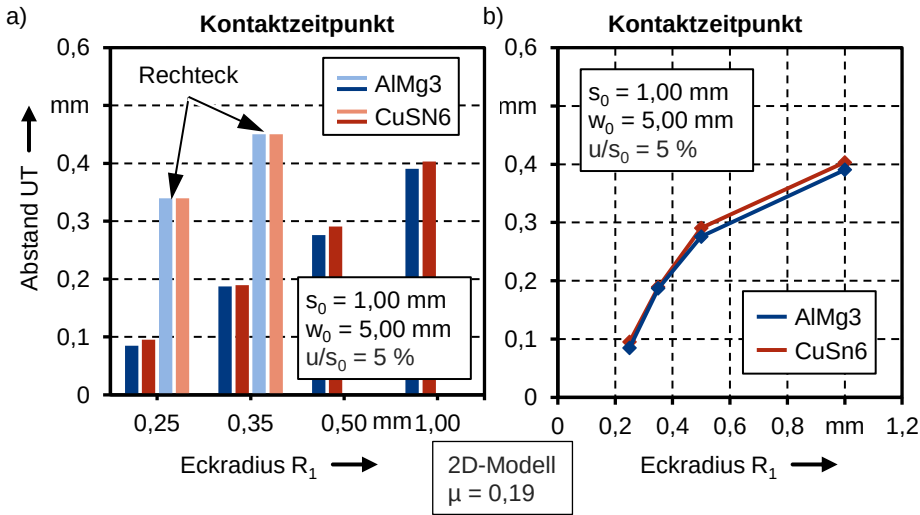


Bild 54: Kontaktzeitpunkt von Werkzeug und Werkstück a) im Vergleich zwischen schergeschnittenen und rechteckigen Einlegern und b) in Bezug auf den Eckradius

Wie bereits dargelegt, wird die Formfüllung wesentlich durch den Einlegerquerschnitt und somit final vom Bauteilvolumen bestimmt. Die Variation der Querschnittsfläche ist durch die folgenden drei Aspekte beeinflusst:

- die Dickentoleranz
- die Breitentoleranz
- die Schnittkantengeometrie

Bei der Schnittkantengeometrie und der Dickentoleranz handelt sich um halbzeugspezifische Einflussfaktoren. Die Schnittkantengeometrie ist jedoch stets im Zusammenhang mit dem Schneidprozess zu bewerten. Die Dickentoleranz wiederum weist eine indirekte Abhängigkeit vom Werkstoff oder der Werkstoffklasse auf, welche sich aus den jeweils normierten Lieferspezifikationen ergibt. Die Breitentoleranz wiederum ist eine konstruktiv festgelegte Größe und wird in Form des Werkzeugs und des Schneidprozesses umgesetzt. Der Einfluss dieser drei Aspekte unterscheidet sich in Art und Ausprägung.

In Bild 55 wird die Darstellung des Einflusses unterschiedlicher Toleranzen auf den Querschnitt aus Bild 50 aufgegriffen und um den Aspekt der Schnittkantengeometrie erweitert. Die absolute Abweichung vom Nennquerschnitt durch die Schnittkanten ist wie bei der Breitentoleranz konstant und unabhängig von der Einlegerbreite. Das bedeutet, dass der relative Anteil mit größerer Einlegerbreite und somit größerer Querschnittsfläche abnimmt. In Bild 55 wurde die Flächendifferenz der unterschiedlichen Schnittkanten und dem ideal rechteckigen Querschnitt bezogen zum Nennquerschnitt dargestellt. Dadurch kann der große relative Einfluss der Schnittkanten bei schmalen Einlegern aufgezeigt werden. An der Untergrenze ergibt sich eine relative Querschnittsabweichung von 12,63 % für AlMg3 und von 6,99 % für CuSn6.

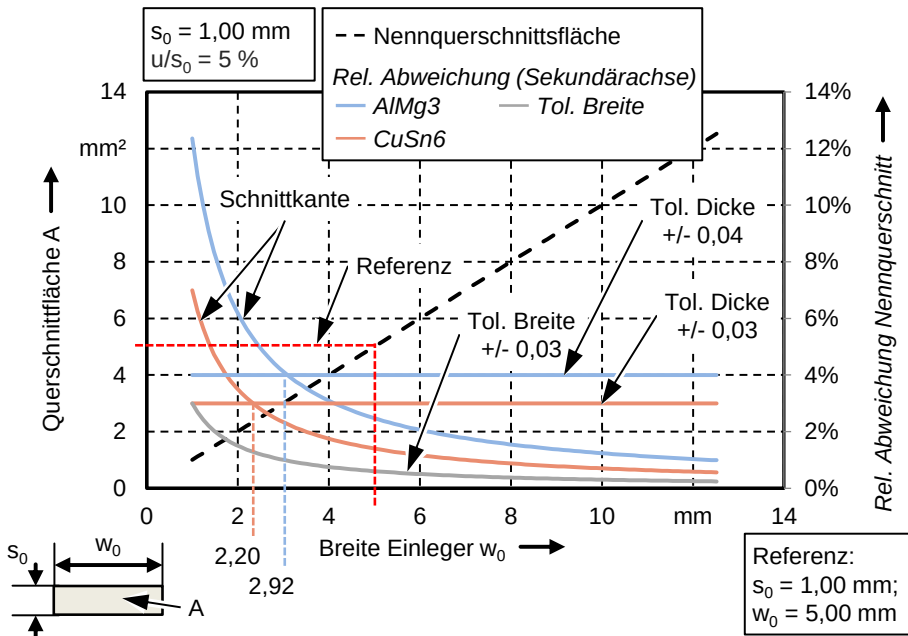


Bild 55: Einflüsse der Maßtoleranzen und der Schnittkanten auf die Querschnittsfläche in Abhängigkeit der Einlegerbreite

Für schmale Einleger ist die Schnittkante der dominierende Einfluss auf die Querschnittsabweichung. In Abhängigkeit des Werkstoffs, wodurch sowohl die Schnittkante als auch die Dickentoleranz bestimmt wird, ergeben sich an den Schnittpunkten der Kurven unterschiedliche Einlegerbreiten, bei denen ein Wechsel des dominierenden Einflusses vorliegt. Für CuSn6 ergibt sich der Übergang bei einer Einlegerbreite von 2,32 mm, wohingegen bei AlMg3 dieser bei 3,04 mm liegt. Wäre bei AlMg3 die Blechdicke enger

toleriert, würde der Wechsel des dominierenden Einflusses bei noch größerer Einlegerbreite erfolgen. Im gegebenen Fall ist die Breitentoleranz $\pm 0,03$ mm gleich oder kleiner als die Dickentoleranz und hat daher ab einer Einlegerbreite größer 1 mm den geringsten Anteil hinsichtlich der relativen Abweichung. Für die Einlegerbreite von $w_0 = 5$ mm, was in Bild 55 gekennzeichnet ist durch die gepunkteten Linien, ist der Einfluss der Dickentoleranz dominierend. Die Schnittekantengeometrie bewirkt eine relative Abweichung vom Nennquerschnitt von 2,47 % für AlMg3 und 1,40 % für CuSn6. In Relation zur Dickentoleranz ist der Anteil der Schnittekantengeometrie etwa 62 % für AlMg3 und 47 % für CuSn6. Der Einfluss der Breitentoleranz liegt bei 0,60 %, was wiederum bezogen auf die Dickentoleranz bei AlMg3 einem Anteil von 15 % und bei CuSn6 von 20 % entspricht.

Aus den Untersuchungen geht hervor, dass ein werkstoffspezifischer Einfluss durch die unterschiedlichen Schnittekantengeometrien schergeschnittener Einleger besteht. Neben der Querschnittsabweichung, die durch die Schnittekante bedingt ist, äußert sich die Formabweichung in einem späteren Kontaktzeitpunkt zwischen Werkzeug und Werkstück. Darüber hinaus führt die Formabweichung zu Unterschieden hinsichtlich der Umformzone und der lokalen Umformgrade. Während an der Kante der Bruchzone eine deutliche Umformung stattfindet, ist diese aufgrund des Kantenzeinzugs an der oberen Kante wesentlich geringer. Die Wechselwirkung des Schneidprozesses und des Kantenprägens muss daher bei der Prozessauslegung berücksichtigt und der Eckradius für die Verrundung so gewählt werden, dass eine Verrundung aller scharfen Kanten sichergestellt ist.

6.4 Ansätze zur Reduktion der Prozesssensitivität

Aufbauend auf den Erkenntnissen, dass der Kantenprägeprozess starken Einflüssen durch Toleranzschwankungen unterworfen ist, leitet sich der Bedarf einer Prozesskonfiguration mit reduzierter Sensitivität gegenüber Toleranzschwankungen ab. Hierbei ist sowohl eine ausreichende Umformung scharfer Kanten sicherzustellen und gleichzeitig eine Überfüllung der Kavität zu vermeiden. Für die hier vorliegende Einlegerbreite von $w_0 = 5$ mm hat die Dickentoleranz entsprechend Bild 55 den größten Einfluss auf die Querschnittsfläche. Bei einem weggebundenen Prozess, wie er in einer Schnellläuferpresse vorliegt, bleibt der minimale Abstand der Kavitäten konstant. Geht man davon aus, dass dieser Abstand der Nennblechdicke, also $a_{1, \min} = 1$ mm, entspricht, bedeutet das im Extremfall, wenn der Werkstoff an der oberen Toleranzgrenze liegt, dass der gesamte Einleger um die Dickentoleranz gestaucht wird. Dies geht gleichzeitig mit einer

Überfüllung der Kavität und Gratbildung sowie sehr hohen Prozesskräften einher, welche das Arbeitsvermögen der Presse übersteigen können. Um diesen Grenzfall zu vermeiden, ist ein zielführender Ansatz, den minimalen Abstand $a_{i \min}$ der Kavitäten im UT auf die obere Blechdickentoleranz zu vergrößern und damit eine vollflächige Umformung des Einlegers in jedem Fall zu verhindern. Jedoch geht mit einem größeren Abstand der Kavitäten im UT eine geringe Umformung der Kanten und somit eine unzureichende Kantenverrundung einher. Dies ist insbesondere bei schergeschnittenen Einlegern an der unteren Toleranzgrenze der Fall. Dem kann durch den Einsatz größerer werkzeugseitiger Eckradien begegnet werden. Wie in Bild 54 b) dargestellt, kann der Kontaktzeitpunkt zwischen Werkzeug und Werkstück in Abhängigkeit des Eckradius verschoben werden. Dadurch findet bei einem größeren Eckradius bereits bei mehr Abstand vor UT eine Umformung im Kantenbereich statt, wodurch eine Kantenverrundung für Einleger an der unteren Toleranzgrenze erreicht wird. Im Zuge einer Grenzwertanalyse der Einlegerabmessungen sind in Bild 56 die Prozesskraftverläufe für die Eckradien von 0,50 mm und 1,00 mm dargestellt.

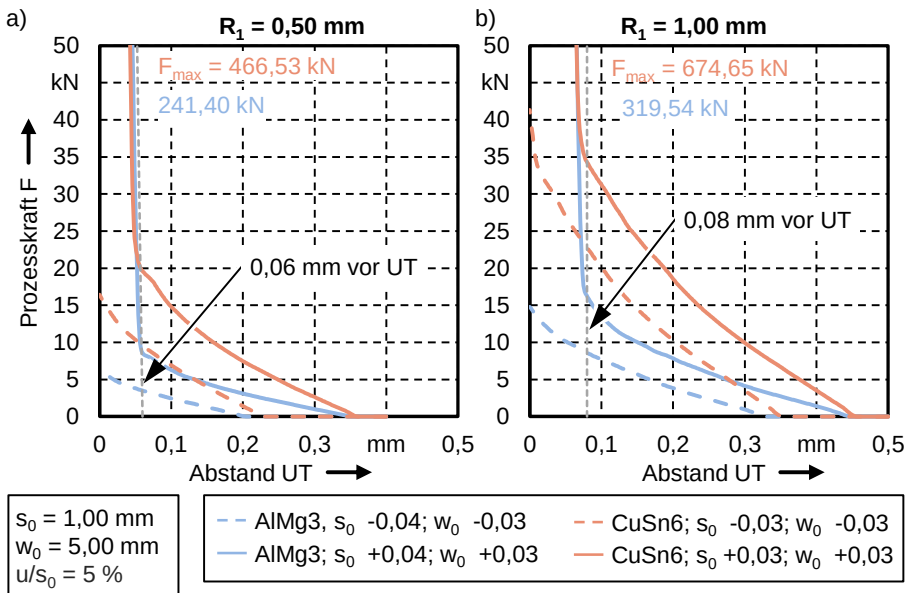


Bild 56: Prozesskräfte beim Kantenprägen eines schergeschnittenen Bauteilquerschnitts für große Eckradien a) $R_1 = 0,50 \text{ mm}$ und b) $R_1 = 1,00 \text{ mm}$

Während für CuSn6 und einen $R_1 = 1,00 \text{ mm}$ in Bild 56 b) die Kraftbedarfe im untern Grenzfall maximal bei etwa 40 kN liegen, treten für den oberen Grenzfall von 241,40 kN bis 674,65 kN auf. Damit würden die Prozesskräfte gerade für CuSn6 im Bereich der maximalen Pressenkraft von 510 kN der

hier zugrunde gelegten Schnellläuferpresse überschritten. Durch eine Verschiebung des UT nach oben kann dies verhindert werden. Der steile Kraftanstieg markiert den Zeitpunkt der vollständigen Formfüllung. Gemäß der grauen Strichlinie in Bild 56 kann für $R_1 = 0,50$ mm bei einer Verschiebung von UT um 0,06 mm und für $R_1 = 1,00$ mm um 0,08 mm der steile Kraftanstieg vermieden werden. Für $R_1 = 0,50$ mm in Bild 56 a) liegen die Kraftbedarfe im oberen Grenzfalle bei 8,50 kN für AlMg3 und 19,57 kN für CuSn6 und sind damit wesentlich geringer als die maximalen Prozesskräfte. Gleiches zeigt sich auch für den Eckradius $R_1 = 1,00$ mm, wobei durch die größeren umgeformten Bereiche die Prozesskräfte höher sind im Vergleich zu $R_1 = 0,50$ mm. Daher ist auch eine größere Verschiebung des UT um 0,08 mm notwendig, um den steilen Kraftanstieg zu vermeiden. Die Prozesskräfte liegen hierbei bei 31,94 kN für AlMg3 und nur geringfügig höher mit 34,26 kN für CuSn6. Die aus der Verschiebung resultierenden Kantenformen in Abhängigkeit der Eckradius und des Werkstoffs sind in Bild 57 in dargestellt.

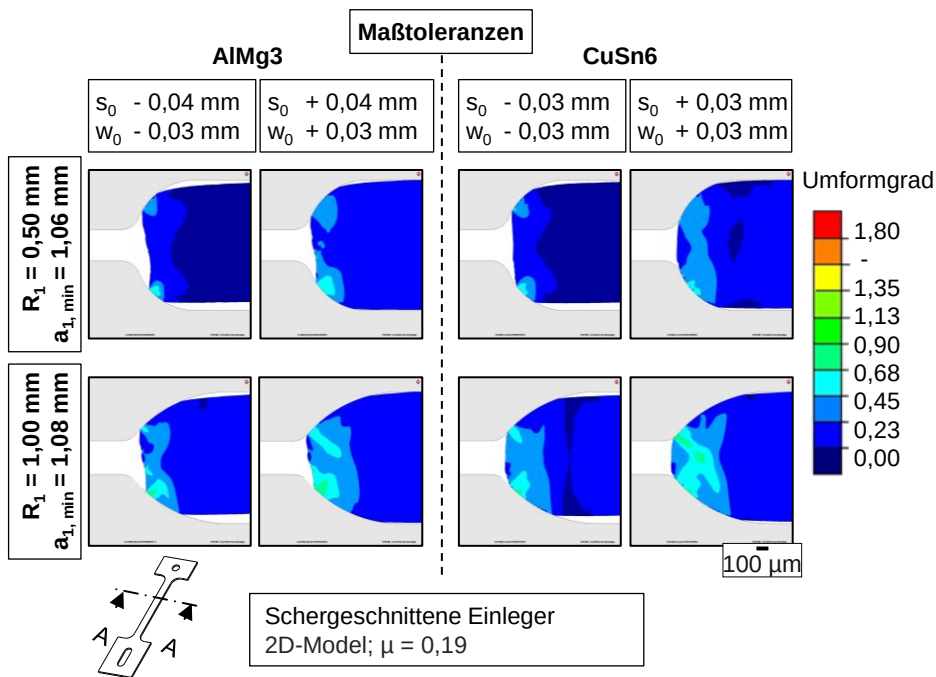


Bild 57: Einfluss großer Eckradien und Schnittkanten auf das Kantenprägen Bild

Im Gegensatz zu Bild 47 kann eine Überfüllung der Kavität für die Einlegervariante an der oberen Toleranzgrenze vermieden und die Dickentoleranz kompensiert werden. Durch die größeren Eckradien tritt auch bereits

beim unteren Grenzfall insbesondere für AlMg₃ eine Umformung und eine wenigstens unvollständige Verrundung der Kanten auf. Im Hinblick auf eine Reduzierung der Spannungskonzentration beim umspritzten Hybridbauteil ist eine vollständige Ausformung und idealerweise ein stetiger, tangentialer Übergang an den Einlegern anzustreben. Diese Forderung wird für CuSn6 und einem Eckradius von 0,50 mm durch einen flachen Übergangswinkel gut erfüllt. Bei einem Eckradius von 1,00 mm wird zwar ein stetiger Übergang der Ober- und Unterseite des Einlegers erreicht, jedoch ist der Übergang des Radius in die Seitenfläche durch eine Übergangskante gekennzeichnet. Diese ist weniger stark ausgebildet und der Übergangswinkel ist kleiner als bei einer rein schergeschnittenen Kante. Vor diesem Hintergrund ist die resultierende Kanten geometrie bei großen Eckradien wie hier von 1,00 mm hinsichtlich der Spannungskonzentration in Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen und dem resultierenden Einsatzverhalten zu bewerten und dadurch ein Grenzwert für den Eckradius festzulegen.

6.5 Zusammenfassende Erkenntnisse

Anhand der vorliegenden Untersuchungen konnte das Kantenprägen mit offenem Gesenk für das umformtechnische Verrunden metallische Einleger qualifiziert werden. Als zentrale Einflussgröße auf die Formfüllung und somit die Abbildungsgenauigkeit wurde die Querschnittsfläche des Einlegers bzw. das Volumen abgeleitet. Der Prozess hat eine hohe Sensitivität bzgl. der Blechdickentoleranz insbesondere bei zunehmender Stegbreite der Einleger. Anhand der Untersuchung kann geschlossen werden, dass das Kantenprägen vorrangig durch die geometrischen Parameter des Werkzeugs und des Einlegers bestimmt ist. Die drei geometrischen Einflüsse des Einlegers gliedern sich in die Schnittkantengeometrie, die Breiten- und die Dickentoleranz. Einflüsse durch den Werkstoff äußern sich indirekt im Kontext des vorgelagerten Scherschneidprozesses. Da die Schnittkantengeometrie das Volumen des Einlegerquerschnitts beeinflusst, wirkt sich dies auf die Abbildungsgenauigkeit der Eckradien der Kavität aus. Um eine prozesssichere Verrundung der Einlegerkanten zu erreichen, muss eine Überfüllung der Kavitäten vermieden werden und gleichzeitig bei einer Unterfüllung eine ausreichende Umformung scharfer Kanten sichergestellt werden. Es wurde aufgezeigt, dass über den Einsatz größerer Eckradien die Sensitivität des Prozesses gegenüber Toleranzschwankungen reduziert werden kann, was zu einem stabileren Prozess beiträgt.

7 Grundlegende Analyse der Oberflächenstrukturierung metallischer Einleger mittels Prägen

Eine Strukturierung der Einlegeroberfläche mit Quernuten hat einen positiven Effekt auf die Dichtheit von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen. Das Einbringen solcher Strukturen mittels Prägen ist ein hochproduktives Verfahren, welches als Prozessstufe in ein Folgeverbundwerkzeug integriert werden kann. Für die gezielte Auslegung solcher Strukturen ist jedoch ein grundlegendes Prozessverständnis hinsichtlich des Werkstoffflusses, der resultierenden Einlegergeometrie inklusive der Kanten geometrie sowie der Abbildungsgenauigkeit der Strukturen notwendig. Im Sinne einer Labyrinthdichtung mit mehreren nebeneinanderliegenden Quernuten soll die Strukturierung zur Verlängerung möglicher Leckagepfade und somit zu Erhöhung der Dichtheit beitragen. Daher gilt es nicht nur, das Einprägen einer einzelnen Nut zu untersuchen, sondern gerade das Zusammenspiel und die Wechselwirkung mehrerer nebeneinanderliegenden Strukturen zu analysieren. Es sind sowohl die resultierenden makroskopischen Geometriemerkmale des Einlegers als auch die Nutgeometrie im Mikrobereich von Bedeutung. Das Nutprägen ist als Einprägeprozess konzipiert, so dass an sich nur die Rippen des Stempels Kontakt mit dem Werkstück haben. Die Eindringtiefe ergibt sich aus über den Pressenhub und kann somit über die Hublage variiert werden. Im Hinblick auf die prozesssichere Einlegerherstellung und Weiterverarbeitung im Montagespritzguss sind als weitere Aspekte die Stabilität der geprägten Einleger für die automatisierte Handhabung und die Werkzeugbelastung im Prägeprozess zu berücksichtigen. In diesem Kapitel wird daher der Einfluss der Strukturbreite in Abhängigkeit der Prägetiefe untersucht. Hierfür wird ein kombinierter simulativ-experimenteller Ansatz verwendet. Auf Basis dessen werden Wirkzusammenhänge im Prägeprozess analysiert und ein Prozessfenster für das umformtechnische Strukturieren metallischer Einleger abgeleitet.

7.1 Prozess- und Stoffflussanalyse des Einprägens

Der Nutprägeprozess besteht aus zwei identischen Stempeln, welche jeweils vier Rippen aufweisen, welche die Nutform bestimmen. Im Prozessverlauf liegt der Einleger auf dem unteren Stempel auf und der obere Stempel wird verfahren, so dass ein simultanes, symmetrisches Einprägen von

Nuten in den Einleger stattfindet. Da es sich um einen offenen Prägeprozess handelt, ist der Werkstofffluss entlang und quer zu den Rippen nicht durch ein umschließendes Gesenk gehemmt. Durch das Eindringen der Rippen in den Einleger und das lokale Stauchen ähnlich dem Flachstauchversuch wird entsprechendes Werkstoffvolumen verdrängt. Bei diesem Vorgang treten zwei wesentliche Stoffflussrichtung auf. Zum einen entsteht ein axialer Werkstofffluss entlang der Längsachse des Einlegers, was eine globale Längung des Einlegers bewirkt. Zum anderen führt ein lateraler Werkstofffluss insbesondere im Bereich der eingepprägten Nuten zu der Formung lokaler Ausbauchungen, welche die Kanten geometrie bestimmen. In Bild 58 ist die lokale Breite nach der Umformung als w_1 gekennzeichnet. Die Breitung ergibt sich als Differenz aus der Ausgangsbreite w_0 und w_1

$$\Delta w = |w_1 - w_0| \quad (7)$$

und wird in der Form der relativen Breitung

$$rel. \Delta w = \frac{\Delta w}{w_0} \quad (8)$$

als bezogene Größe verwendet. In gleicher Weise wird die Längung des Einlegers als

$$\Delta l = |l_1 - l_0| \quad (9)$$

beschrieben. Im Hinblick auf die Längung ist der Stofffluss quer zu den einzelnen Rippen in Reihe geschaltet und kumuliert sich zu einer globalen Längung des Einlegers. Hingegen ist die lokale Breite längs der Rippen parallelgeschaltet und prinzipiell von den anderen Rippen entkoppelt. Gleichzeitig die Ausbildung der Breitung an den einzelnen Nuten durch die Position und die Umgebungsbedingungen beeinflusst.

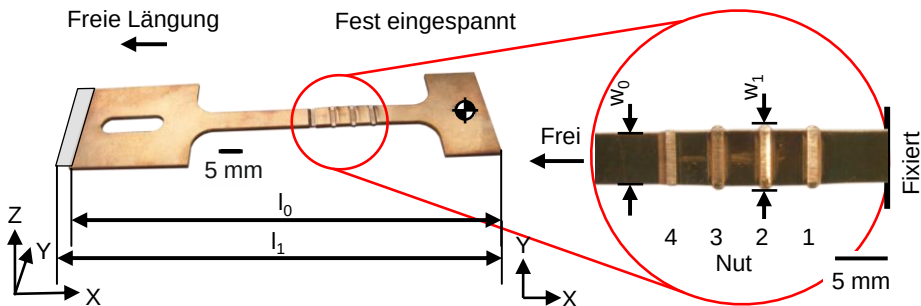


Bild 58: Einleger mit geprägten Nuten

7.1.1 Axialer Werkstofffluss

In Bild 59 ist der repräsentative, halbe Längsschnitt durch den Einleger in kompakter Form als Zusammensetzung aus den einzelnen Nuten dargestellt. Im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Rippenbreiten der Stempel ist die Prägetiefe $p = 0,10 \text{ mm}$ abgebildet. An dieser kann die wesentliche Charakteristik des Prozesses gezeigt werden. Der Maßstab wurde entsprechend der jeweiligen Nutbreite angepasst.

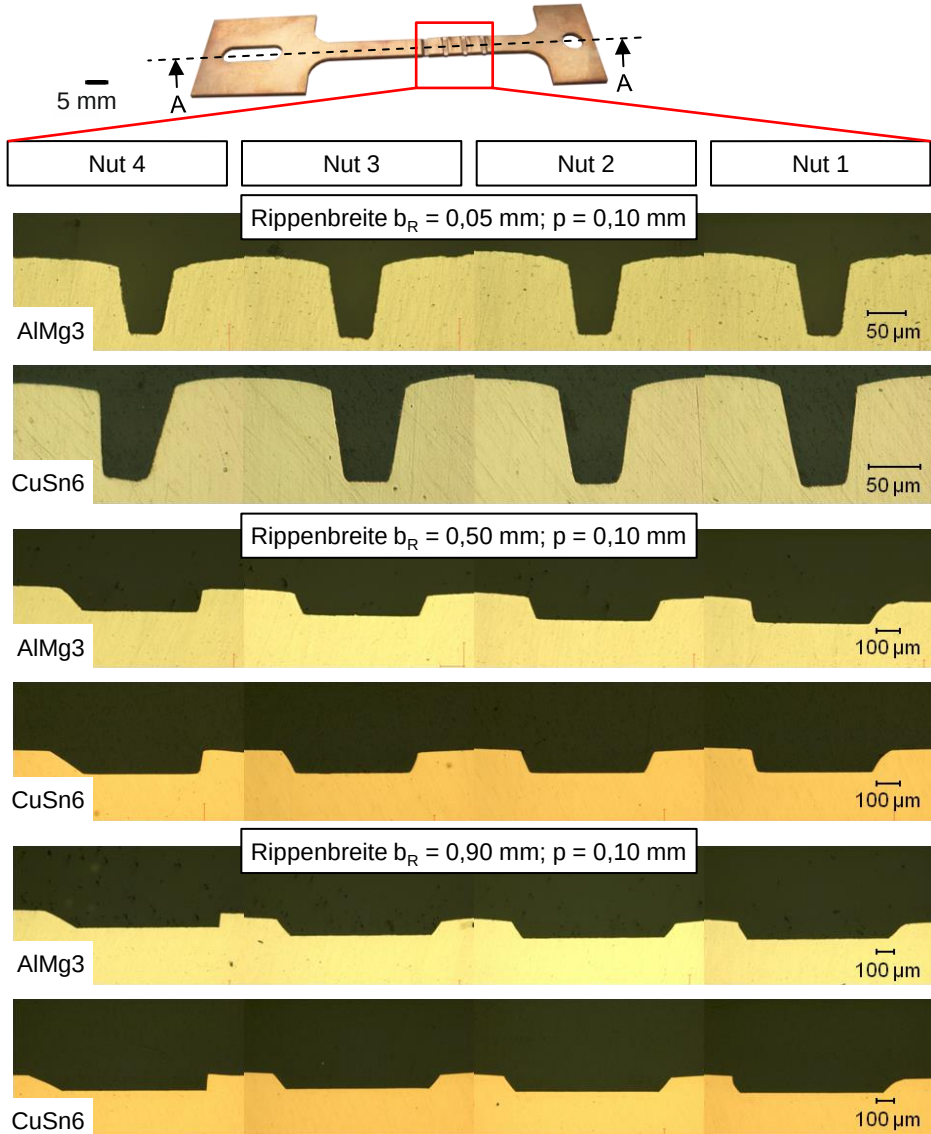


Bild 59: Aus Schlißbildern der Nuten zusammengesetzter Längsschnitt des Einlegers

Für alle Varianten in Bild 59 unabhängig vom Werkstoff kann für die beiden innenliegenden Nuten 2 und 3 eine symmetrische Nutform festgestellt werden. Für die Rippenbreite 0,05 mm ist die Abbildung aller vier Nuten recht gleichmäßig. Für die Rippenbreiten 0,50 mm und 0,90 mm wird bereits eine Abweichung der Nutgeometrie von der Rippengeometrie anhand des Flankenwinkels ersichtlich, welcher größer ist als $\alpha = 7^\circ$. Zusätzlich tritt eine zunehmend unsymmetrische Abbildung der Stempelgeometrie mit größerer Rippenbreite für die äußeren Nuten 1 und 4 auf. Hierbei ist die innen liegende Nutflanke steil, während die äußere Flanke vergleichsweise flach ausläuft. Dies gilt gerade für Nut 4, an welcher eine freie Längung durch das Langloch möglich ist. Dass dies ebenfalls wenigstens in schwächerer Form an Nut 1 auftritt, ist einem gewissen Spiel zwischen Einleger und Zentrierstift geschuldet. Ursächlich hierfür ist ein axialer Werkstofffluss, welcher durch das Eindringen der Prägestempel ähnlich dem Flachstauchversuch zu einer lokalen Stauchung des Werkstoffs und somit zu einer Verdrängung des Werkstoffs quer zu den Rippen führt. Wie in Bild 60 dargestellt, treten durch angrenzende Nuten sich entgegengesetzte Werkstoffflüsse auf.

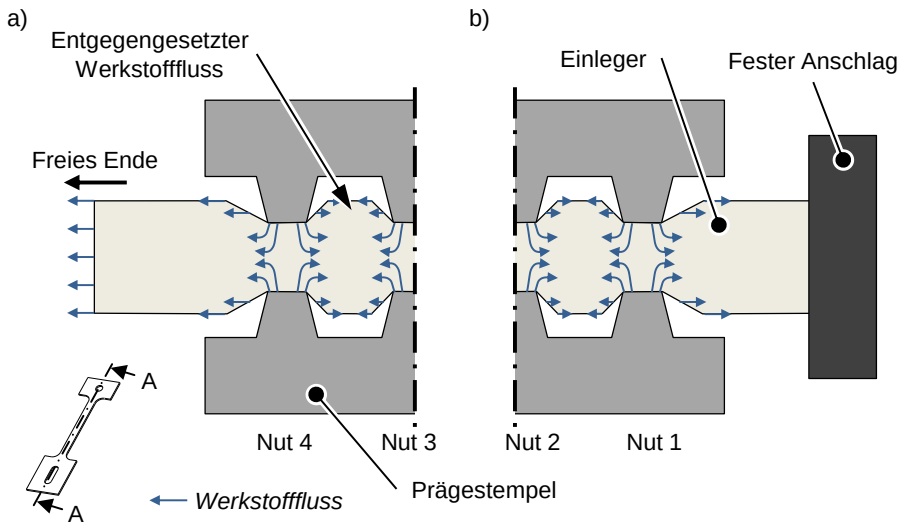


Bild 60: Schematische Darstellung des Werkstoffflusses bei a) mehreren Nuten und freiem Ende sowie b) mit fixiertem Ende durch einen festen Anschlag

Somit wird ein ungehinderter axialer Werkstofffluss durch die Stoffflüsse der benachbarten Nuten eingeschränkt, was im vorliegenden Prozess für Nut 2 und Nut 3 der Fall ist. Im Randbereich (Nut 4) führt jedoch das freie Ende zu einer unsymmetrischen Ausbildung der Nutgeometrie, wobei das freie Ende sich ungehindert längen kann und die Ausbildung eines flachen

Flankenwinkels bewirkt. An der anderen Seite staut sich der Werkstoff mit einem steilen Flankenwinkel an der Rippe des Stempels auf, was anhand der Schliffbilder in Bild 59 für die Rippenbreite 0,50 mm und 0,90 mm zu erkennen ist. Da der Stofffluss dem geringsten Fließwiderstand folgt, resultiert daraus eine Belastung der Rippen durch Querkkräfte, welche zu einer unsymmetrischen Beanspruchung der Rippen, insbesondere im Randbereich bei Nut 4, führen. In Bild 61 sind daher die maximalen Hauptspannungen für die Rippenbreite von 0,05 mm und 0,50 mm dargestellt. Die Querkraft führt aufgrund des großen Aspektverhältnisses der schmalen Rippe von $h_R/b_R = 6:1$ bereits bei einer Eindringtiefe von $p = 0,10$ mm zu merklichen Zugspannungen im Rippenfuß. Hingegen weist die Rippenbreite $b_R = 0,50$ mm mit einem Aspektverhältnis von $h_R/b_R = 0,6:1$ eine gedrungene Form auf, weshalb gemäß Bild 61 selbst bei einer Eindringtiefe von 0,30 mm Druckspannungen die Beanspruchung dominieren. Dies ist auf Rippengeometrien mit gleichem oder kleinerem Aspektverhältnis übertragbar und gilt somit auch für $b_R = 0,90$ mm.

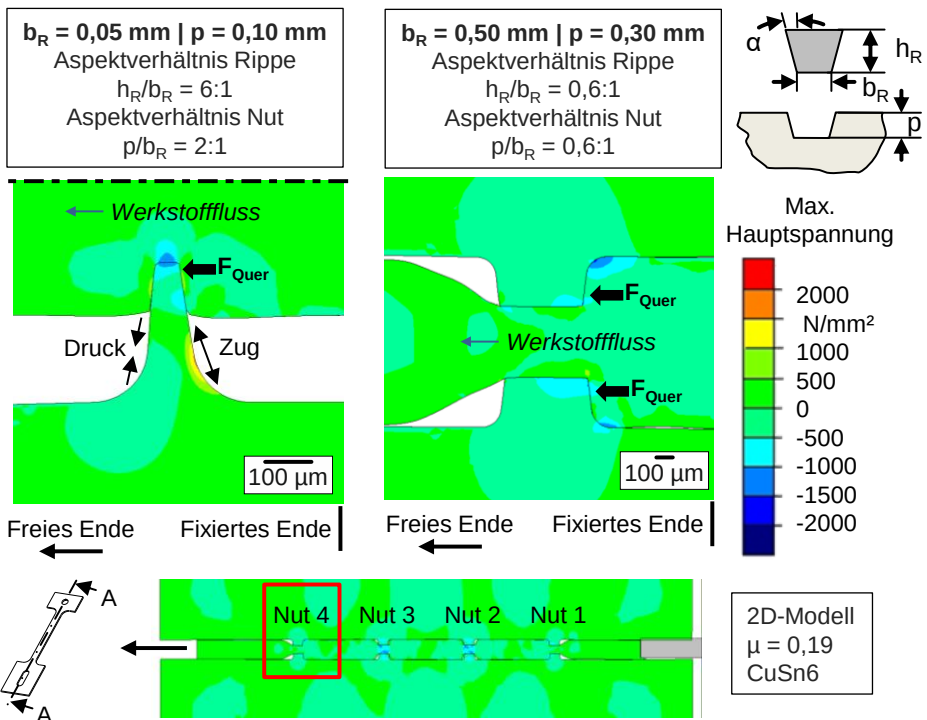


Bild 61: Werkzeugbeanspruchung durch den axialen Werkstofffluss an Nut 4 für die Rippenbreiten von 0,05 mm und 0,50 mm

Während für Rippen mit Aspektverhältnissen kleiner 0,6:1 die Beanspruchung und die elastische Deformation beim Einprägen gering ist, wirkt sich die Querkraft für eine Rippenbreite von 0,05 mm, wie in Bild 59 erkennbar, durch eine Verkipfung der Nutgeometrie nach außen aus. Dies bedeutet, dass eine unsymmetrische Belastung bei schmalen, hohen Rippen einerseits zu einer Formabweichung der Nut führt und andererseits die auftretenden Zugspannungen einen versagenskritischen Aspekt darstellen, da die Beanspruchbarkeit des Werkzeugwerkstoffs im Druckbereich wesentlich höher ist als im Zugbereich. Infolgedessen kommt es zum Versagen wie in Bild 62 anhand der gebrochenen Rippe zu erkennen ist. Wie beschrieben, tritt das Versagen an der äußeren Rippe durch die unsymmetrische Belastung auf. Anhand der Abriebspuren auf dem Stempel in x-Richtung wird deutlich, dass der Versagensbereich lokal auf die Breite des Einlegers beschränkt ist. Die hohe Werkzeugbeanspruchung durch Querkräfte infolge des axialen Werkstoffflusses begrenzt somit den Prägeprozess hinsichtlich schmaler und tiefer Nuten. Darüber hinaus ist der axiale Stofffluss ein wesentlicher Einfluss auf die resultierende Nutgeometrie.

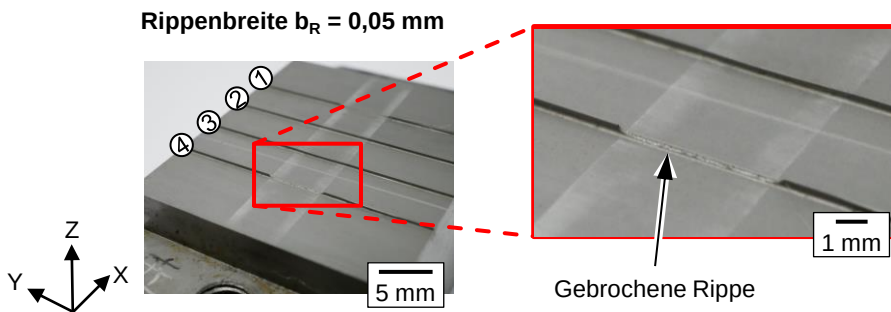


Bild 62: Prägestempel mit einer Rippenbreite von 0,05 mm mit gebrochener Rippe

7.1.2 Lateraler Werkstofffluss

Neben dem axialen tritt ein lateraler Werkstofffluss auf, welcher zur lokalen Breitung in Form von Ausbauchungen an den Nuten führt. Diese variiert mit der Nutposition, weshalb hier die funktionalen Zusammenhänge und Einflüsse erläutert werden sollen. Ausgangspunkt ist, dass an den einzelnen Nuten unterschiedliche Randbedingungen herrschen. Während Nut 2 und 3 symmetrisch von den äußeren Nuten 1 und 4 umschlossen sind, ist an Nut 1 der Einleger über einen Zentrierstift fixiert und an Nut 4 ist eine freie Längung möglich. Diese unterschiedlichen Bedingungen an

den einzelnen Nuten äußern sich auch im Hinblick auf den lokalen lateralen Werkstofffluss und somit die unterschiedlich starke Ausbildung von Ausbauchungen wie in Bild 63 zu erkennen ist.

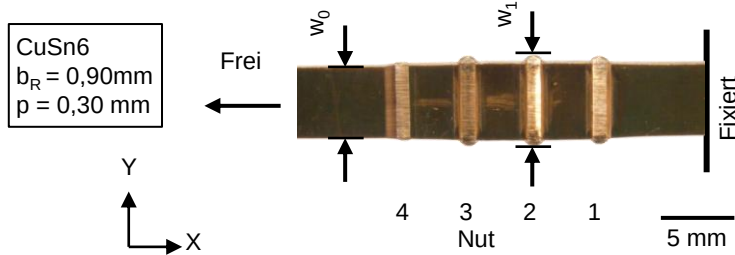


Bild 63: Lokale Breitung am Einleger

Um den Einfluss der unterschiedlichen Rahmenbedingungen zu verdeutlichen, ist in Bild 64 b) die gemessene relative Breitung für eine Rippenbreite von 0,50 mm und 0,90 mm über die unterschiedlichen Nutpositionen aufgetragen. Lediglich für die leichtere Zuordnung der Messergebnisse sind die einzelnen Punkte mit Linien verbunden. Für die $b_R = 0,05$ mm konnten keine verwertbaren Messergebnisse erfasst werden, da die sehr geringe lokale Breitung bereits durch das Messmittel verformt wird und somit die Ergebnisse verfälscht werden. Die Streuung der dargestellten Messergebnisse ist gering, daher sind die Fehlerbalken teils verdeckt.

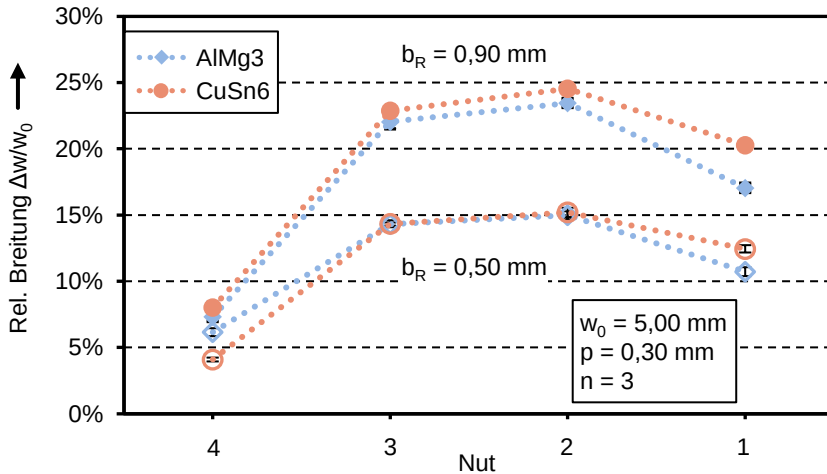


Bild 64: Relative Breitung in Abhängigkeit der Nutposition [167]

Die Breitung ist für beide Rippenbreiten qualitativ gleich. Die quantitativen Unterschiede in Abhängigkeit der Rippenbreite folgen der Gesetzmäßigkeit der Volumenkonstanz, wobei eine größere Rippenbreite eine stärkere

lokale Breitung bewirkt. In Bild 64 ist die relative Breitung exemplarisch für eine Einlegerbreite von 5 mm aufgetragen. Die geringste Breitung tritt erwartungsgemäß an Nut 4 in der Größenordnung 4 - 8 % auf, da hier die freie Längung des Einlegers möglich ist. An Nut 2 wiederum ist die Breitung am stärksten mit Werten von etwa 24 % für $b_R = 0,90$ mm und etwa 15 % für $b_R = 0,50$ mm, da hier die stärksten Restriktionen hinsichtlich des axialen Stoffflusses vorliegen. Für Nut 3 wird eine Breitung in der Größenordnung von Nut 2 ermittelt, trotz ähnlicher Bedingung hinsichtlich der axialen Fließbehinderung ist die Breitung 1,5 % und 0,8 % kleiner als bei Nut 2. Obwohl an Nut 1 der Einleger durch einen Zentrierstift fixiert ist und somit der axiale Stofffluss beschränkt ist, fällt die Breitung um 2,8 - 6,5 % merklich geringer aus im Vergleich zu Nut 2. Gleichzeitig ist die Breitung aber größer als am freien Ende bei Nut 4. Neben dem Spiel zwischen Einleger und Zentrierstift und der damit verbundenen kleinen Längung bis zur vollständigen Anlage, ist dies auch auf den einseitigen Werkstofffluss gegen den Festanschlag zurückzuführen. Die größeren Abweichungen für AlMg₃ an Nut 1 sind einem fertigungsbedingten größeren Spiel der Einleger geschuldet. Trotz der um den Faktor drei höheren Dehngrenze von CuSn6 sind die Unterschiede in der Größenordnung von 1 % zwischen den beiden Werkstoffen relativ gering. Daraus folgt, dass geometrische Aspekte des Prozesses einen dominierenden Einfluss im Vergleich zu den Werkstoffeigenschaften haben.

Anhand der Verteilung in Bild 64 b) wird der Zusammenhang zwischen axialen Fließbehinderungen und der lokalen Breitung deutlich. Es sind drei Arten der Fließbehinderung zu unterscheiden:

- **Entgegengesetzter Werkstofffluss:** Die Fließbehinderung entsteht durch das verdrängte Werkstoffvolumen benachbarter Nuten, welches entsprechend Bild 60 entgegengerichtet ist. Der Wirkungsbereich ist innerhalb des Werkstoffvolumens in der Blechebene.
- **Formschluss:** Der Zentrierstift stellt einen festen Anschlag und somit eine passive, mechanische Fließbehinderung dar. Diese nimmt lediglich die Reaktionskräfte durch den einseitigen Werkstofffluss auf. Der Wirkungsbereich ist ebenfalls innerhalb des Werkstoffvolumens.
- **Reibung:** Diese tritt zwischen den Stirnflächen der Rippen und des Einlegers auf und wirkt sowohl in axialer als auch lateraler Richtung. Der Wirkungsbereich sind die Grenzflächen zwischen Werkstoff und Werkzeug.

Darüber hinaus können die Arten der Fließbehinderung in die beiden Klassen „aktiv“ und „passiv“ eingeteilt werden.

- Eine **aktive** Fließbehinderung ist dadurch charakterisiert, dass von der Fließbehinderung selbst ein Geschwindigkeitsfeld ausgeht, welches dem Werkstofffluss entgegengesetzt ist.
- Eine **passive** Fließbehinderung zeichnet sich dadurch aus, dass diese nur in Form von Reaktionskräfte des Werkstoffflusses auftreten. Dabei handelt es sich um Gegenkräfte beim Formschluss oder Reibkräfte.

In Abhängigkeit des vorliegenden Mechanismus ändert sich der Grad der Fließbehinderung. Aus der vorliegenden Verteilung lässt sich für die Breitung ableiten, dass die Wirkung in der Reihenfolge entgegengesetzter Werkstofffluss, Formschluss und Reibung abnimmt. Darüber hinaus gilt es, die Fließbehinderung an den einzelnen Nuten auch im Kontext der weiteren Rahmenbedingungen zu bewerten. An Nut 2 und 3 liegt jeweils die Fließbehinderung des entgegengesetzten Werkstoffflusses durch benachbarte Nuten vor. Dennoch wird anhand von Bild 64 b) deutlich, dass wiederum auch die Bedingungen an den nachfolgenden Nuten Einfluss auf die lokale Breitung nehmen. Da an Nut 4 durch das freie Ende keine weitere Fließbehinderung in negativer x-Richtung besteht, wird eine axiale Verschiebung des Werkstoffs in diese Richtung begünstigt. Folglich ist der Gegendruck von Nut 4 auf Nut 3 geringer, was sich dann in einer geringeren Breitung äußert. Dies gilt es, bei der Auslegung entsprechender Strukturierungen zu berücksichtigen.

7.2 Analyse der Abbildungsgenauigkeit der Nutgeometrie

Im Hinblick auf die Verwendung der metallischen Einleger für medien-dichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile sind die resultierende Nutgeometrie und die Abbildungsgenauigkeit relevante Aspekte. Für den vorliegenden Prägeprozess kann analog zum Flachstauchversuch von einer ebenen Formänderung im Bereich der Längsebene ausgegangen werden. Erst mit zunehmendem lateralem Abstand von der Längsebene geht dieser in einen dreiachsigen Formänderungszustand über, was somit zur lokalen Breitung führt. Aus diesem Grund wird die Nutgeometrie zunächst in der Längsebene analysiert unter Verwendung von Schliffbildern. Tendenziell werden im Kontext einer Labyrinthdichtung für Kunststoff-Metall-Hybridbauteile scharfe Umlenkungen als Leckagebarriere als vorteilhaft erachtet. Daher erfolgt nachfolgend die Bewertung der Nutgeometrie anhand des resultierenden Flankenwinkels der Nut. Der Flankenwinkel der Rippen auf

den Prägestempel ist für alle Breitenvarianten konstant $\alpha = 7^\circ$. Da die Ausbildung der beiden Flankenwinkel der Nuten bezogen auf deren Lage sich unterscheidet, werden diese nachfolgend gemäß dem Koordinatensystem des Einlegers wie in Bild 65 als α_{+x} und α_{-x} bezeichnet.

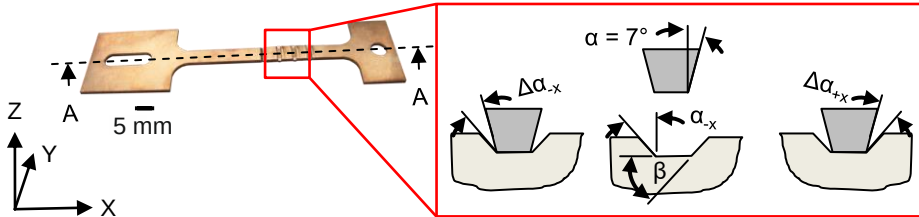


Bild 65: Flankenwinkel an Rippengeometrie und Nut

Die Flankenwinkelabweichung ergibt sich aus der Differenz der Flankenwinkel der Rippen und der jeweiligen Nuten.

$$\Delta\alpha_{+x} = |\alpha_{+x} - \alpha| \quad \text{bzw.} \quad \Delta\alpha_{-x} = |\alpha_{-x} - \alpha| \quad (10)$$

Als relative Flankenwinkelabweichung wird der Bezug zum Soll-Flankenwinkel des Prägestempels hergestellt.

$$\text{rel. } \Delta\alpha_{+x} = \frac{\Delta\alpha_{+x}}{\alpha} \quad \text{bzw.} \quad \text{rel. } \Delta\alpha_{-x} = \frac{\Delta\alpha_{-x}}{\alpha} \quad (11)$$

In Bild 66 ist die relative Flankenwinkelabweichung für Nut 2 als Referenz aufgetragen. Da an Nut 2 der axiale Werkstofffluss in beiden Richtungen in vergleichbarem Maß gehindert ist, bildet sich der Flankenwinkel symmetrisch aus, weshalb nur der Winkel in positiver x-Richtung in Bild 66 a) aufgetragen ist. Mit zunehmender Rippenbreite erhöht sich die Abweichung. Für die schmäleste Variante mit 0,05 mm Breite sind die Abweichungen im Bereich 4–6 %. Unter Berücksichtigung der Streuung ist teilweise von einer Anlage des Werkstücks an der Rippenflanke auszugehen. Bei der Rippenbreite 0,50 mm beträgt die Abweichung bereits über 159 % und bei $b_R = 0,90$ mm kann mit 577 % eine nahezu 6-fache Abweichung für CuSn6 ermittelt werden. Dies wiederum bedeutet, dass kein Kontakt an den Flanken der Prägestempel besteht und somit die Nutgeometrie unabhängig vom Flankenwinkel des Prägestempels ist und nur durch die Stirnflächen der Rippen bestimmt wird. Der Flankenwinkel für $b_R = 0,05$ mm und $b_R = 0,90$ mm bei einer Prägetiefe von 0,10 mm müsste in der Größenordnung von etwa 23° bzw. 38° liegen, um einen Einfluss auf die Nutgeometrie zu haben. Daraus ergibt sich eine Limitation der Abbildungsgenauigkeit rechteckiger Nutgeometrien. Unter Berücksichtigung der Streuung kann

kein Unterschied zwischen den beiden Werkstoffen festgestellt werden. Daraus folgt, dass die Nutgeometrie im Rahmen der zugrundeliegenden Untersuchungen primär von geometrischen Werkzeugparametern bestimmt wird. Daraus ergibt sich prinzipiell eine direkte Übertragbarkeit der Erkenntnisse für andere Werkstoffe. Wie in Abschnitt 7.1.1 aufgezeigt wurde, wirkt sich jedoch die Werkzeugbeanspruchung durch den Stofffluss und die Festigkeit des Werkstückwerkstoffs auf die Werkzeugdeformation aus. Daraus ergibt sich ein indirekter Einfluss auf die resultierende Nutgeometrie, insbesondere bei schmalen Rippen.

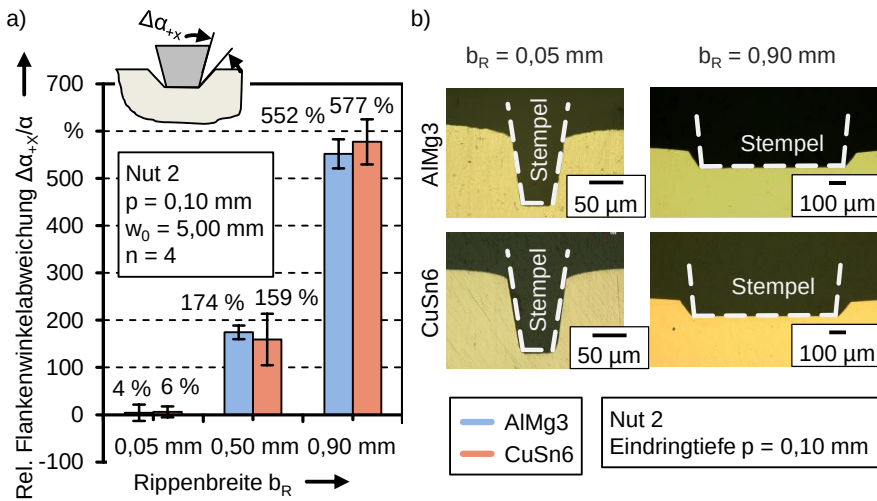


Bild 66: Winkelabweichung und Schlibbilder mit angedeuteter Stempelkontur [167]

Der geometrische Zusammenhang der resultierenden Nutform kann in Anlehnung an den Flachstauchversuch verdeutlicht werden. Für den Flachstauchversuch mit scharfkantigen Stempeln gleicher Breite besteht eine direkte geometrische Beziehung des Knickwinkels β , welcher in Fall des Nutprägens den Komplementärwinkel zum Flankenwinkel α_x der Nut bildet. Unter der Annahme der ebenen Formänderung und der beidseitigen, freien Längung ergibt sich nach [168] aus den Geschwindigkeiten des Stempels und des seitlich austretenden Werkstoffs der Knickwinkel als Verhältnis von Stempelbreite und aktueller Blechdicke. Bezogen auf den vorliegenden Prägeprozess ergibt sich der folgende Ausdruck.

$$\tan \beta = \frac{s}{b_R} \quad (12)$$

Während die Stempel- bzw. Rippenbreite b_R konstant bleibt, verringert sich die Blechdicke s mit fortschreitender Stempelbewegung. Daraus folgt,

dass sich der Knickwinkel und somit der Flankenwinkel über die Eindringtiefe ändert. Mit zunehmender Eindringtiefe wird der Flankenwinkel größer. Der Einfluss auf die Flankenform für den Flachstauchversuch ist in Bild 67 schematisch dargestellt. Damit wird die zunehmende Formabweichung in Abhängigkeit der Stempelbreite und der Eindringtiefe ersichtlich.

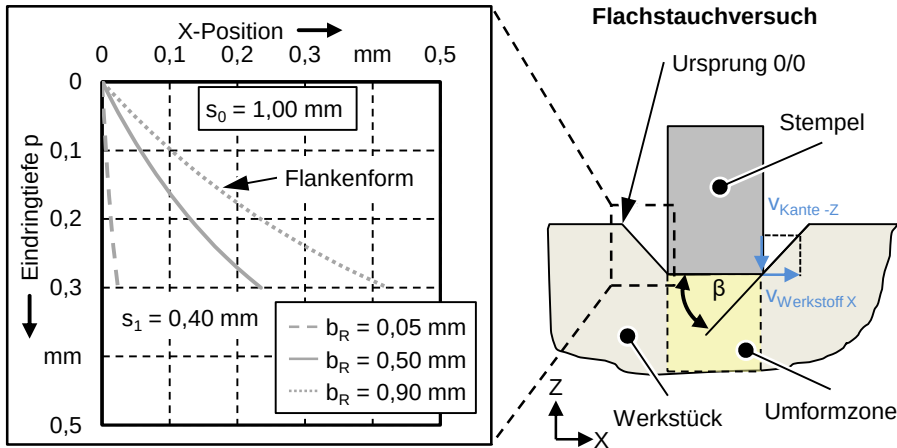


Bild 67: Schematische Darstellung unterschiedlicher Stempelbreiten auf den resultierenden Flankenwinkel beim Flachstauchversuch auf Basis von Formel (12)

Übertragen auf den Prägeprozess mit mehreren Nuten ist die Annahme der beidseitigen freien Längung nicht erfüllt, daher besteht keine direkte quantitative Übertragbarkeit dieses rein analytischen, geometrischen Zusammenhangs. Qualitativ kann daran jedoch die Verknüpfung zwischen der Stempelgeschwindigkeit und der Geschwindigkeit des seitwärts austretenden Werkstoffs gezeigt werden. Ein breiterer Stempel bedeutet tendenziell eine höhere Austrittsgeschwindigkeit des Werkstoffs aus der Umformzone und führt zu einem größeren Flankenwinkel und gemäß Bild 67 zu einer stärkeren Flankenwinkeländerung. Daraus folgt, dass die Erhöhung der Abbildungsgenauigkeit rechteckiger Nutformen nur durch einen zusätzlichen Werkstofffluss, welcher dem austretenden Werkstofffluss entgegengerichtet ist, erreicht werden kann. Im vorliegenden Nutprägeprozess erfolgt dies entweder mittels einer aktiven Fließbehinderung durch den entgegengesetzten Werkstofffluss benachbarter Nuten oder passiv durch den Formschluss durch den Zentrierstift. Darüber hinaus bedeutet es auch, dass die Nutflanke, sofern sich diese ohne direkte Werkzeuganlage ausbildet, keine ideale Gerade darstellt. Dies kann auch in Bild 68 anhand stark vergrößerter Schliffbilder der Flanken von Nut 2 nachgewiesen werden. In der Grafik sind alle Proben einer Eindringtiefe von 0,10 mm aufgeführt und Linien als Referenz für eine ideal geraden Flanke eingezeichnet. Für die Rippenbreite

$b_R = 0,90 \text{ mm}$ ist die Abweichung deutlich sichtbar. Diese ist für $b_R = 0,50 \text{ mm}$ geringer und ist für $b_R = 0,05 \text{ mm}$ kaum noch zu erkennen. Aus dem Umstand, dass diese Abweichung im gleichen Maß für AlMg₃ sowie für CuSn6 auftritt, kann geschlossen werden, dass in erster Linie die geometrischen Beziehungen die resultierende Nutgeometrie bestimmen. Dies bedeutet, dass der Prozess unter der Voraussetzung einer gleichbleibenden Werkzeugbeanspruchung auf ähnliche Werkstoffe übertragen werden kann.

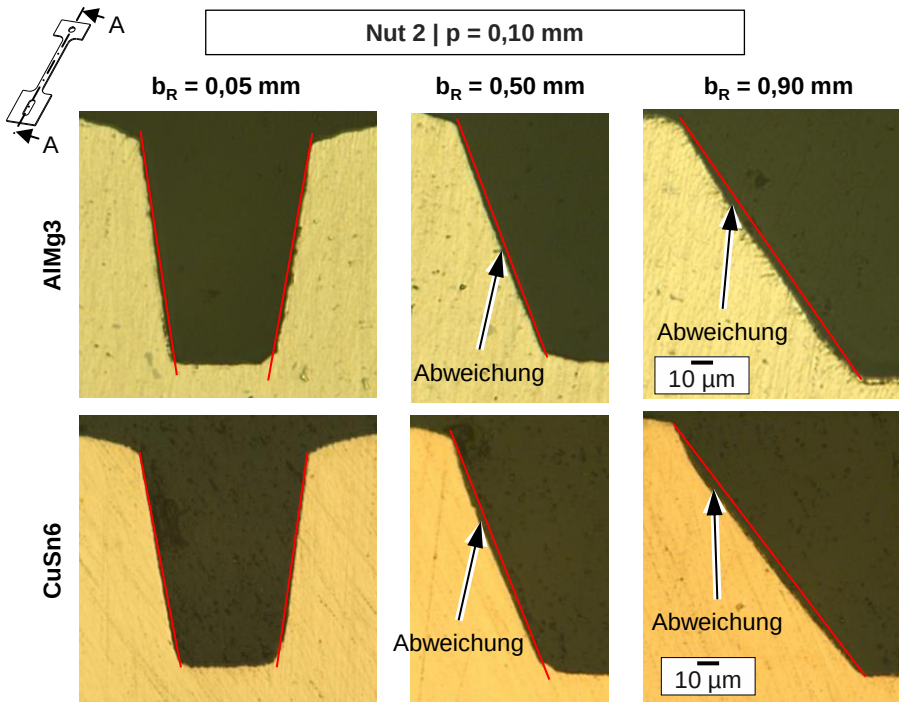


Bild 68: Abweichung der Nutflanken in Abhängigkeit der Stempelbreite

Im Gegensatz zum Flachstauchversuch werden im vorliegenden Nutprägeprozess mehrere Nuten gleichzeitig eingepreßt. Dadurch kommt es zu Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Nuten, welche sich in Form einer Fließbehinderung äußern. Der an der Stirnfläche seitlich verdrängte Werkstoff wird zunächst durch die axiale Fließbehinderung aufgestaut und erfährt eine Umlenkung in z-Richtung. Dadurch wird der Anteil der Geschwindigkeitskomponente in x-Richtung des aus der Umformzone austretenden Werkstoffs reduziert. Folglich ist der resultierende Flankenwinkel und dessen Abweichung von der Soll-Geometrie geringer als in Bild 67. Die Auswirkungen können anhand der Flankenwinkelabweichung über die

einzelnen Nuten nachvollzogen werden. In Bild 69 a) sind die Flankenwinkel negativer und in Bild 69 b) in positiver x-Richtung aufgetragen, um den Richtungseinfluss aufzuzeigen. Die Linien zwischen den Punkten dienen ausschließlich der einfacheren Zuordnung der Messergebnisse.

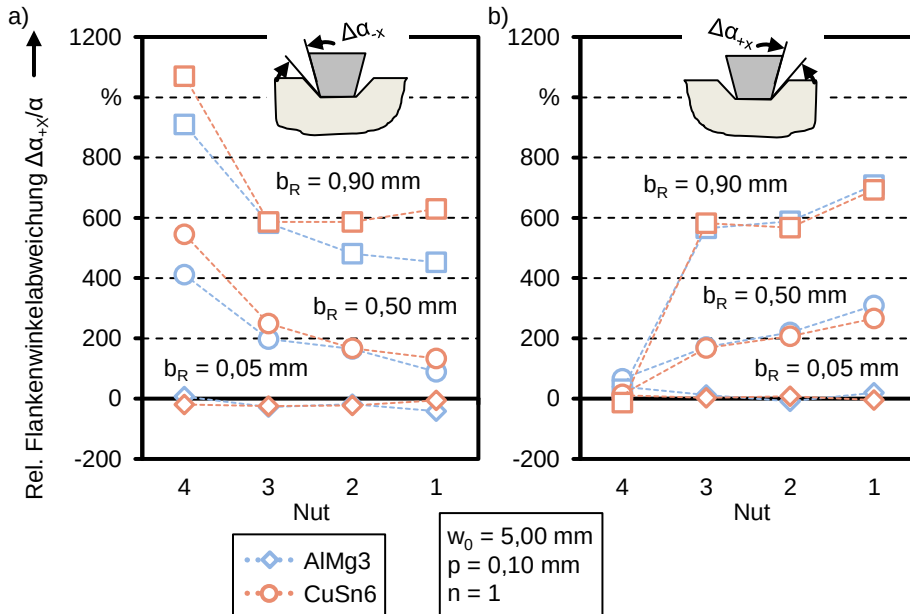


Bild 69: Relative Flankenwinkelabweichung in Abhängigkeit von Nut in a) negative und b) positive x-Richtung

Die ähnlichen Werte für beide Werkstoffe bedeuten, dass geometrische Parameter und die Nutposition einen dominierenden Einfluss gegenüber haben. Für die kleinste Rippenbreite von 0,05 mm ist die Abweichung des relativen Flankenwinkels für beide Orientierungen mit einer Spannweite von 30 % um die Nulllinie vergleichsweise klein. Das bedeutet, dass eine symmetrische Ausformung stattfindet. Auch ist die Ausbildung in Abhängigkeit der Nutposition gleichmäßig. Aufgrund des großen Verhältnisses von Rippenbreite zu Blechdicke ist der seitliche Werkstofffluss klein und somit die Auswirkungen auf die benachbarten Nuten gering. Für größere Rippenbreiten $b_R = 0,50$ mm und 0,90 mm hingegen treten starke Unterschiede sowohl für die beiden Orientierungen des Winkels als auch für die einzelnen Nuten auf. Qualitativ ist das Verhalten für $b_R = 0,50$ mm und 0,90 mm sehr ähnlich. Sehr markant sind die hohen Abweichungen des Flankenwinkels an den außenliegenden Positionen, an denen eine freie Längung oder eine Fixierung durch einen Zentrierstift vorliegt. Die größte Abweichung ergibt sich an Nut 4 durch die freie Längung. Ebenfalls kann für Nut 1 eine

erhöhte Abweichung trotz Fließbehinderung durch einen Zentrierstift festgestellt werden. Dies ist dem experimentellen Aufbau und dem Spiel zwischen Einleger und Zentrierstift geschuldet, so dass zunächst eine geringfügige Verschiebung in x-Richtung auftritt, bevor es zur vollständigen Anlage des Werkstoffs kommt. Mit dem axialen Werkstofffluss geht einher, dass der entgegengerichtete Flankenwinkel in geringerem Maß abweicht. Die Ausbildung des Flankenwinkels ist antiproportional gekoppelt. Im Vergleich zu $b_R = 0,50$ mm tritt daher für $b_R = 0,90$ mm an Nut 4 in Bild 69 a) die größte und in Bild 69 b) die kleinste bzw. nahezu keine Abweichung auf. Gleichzeitig führt die freie Längung und die damit verbundene geringere axiale Fließbehinderung zu einer unsymmetrischen Flankenabweichung über alle vier Nuten.

In Bild 70 ist anhand der Verschiebung des Werkstoffs in x-Richtung der axiale Werkstofffluss verdeutlicht. Mit den breiten Pfeilen ist die Hauptrichtung des Stoffflusses gekennzeichnet, während die schmalen Pfeile den lokalen Werkstofffluss verbildlichen. Für die Eindringtiefe $p = 0,10$ mm ist zu erkennen, dass zunächst an den einzelnen Nuten lokale Werkstoffflüsse in positiver und negativer x-Richtung auftreten. Durch die Anlage des Werkstoffs am festen Anschlag entsteht einseitig eine höhere Fließbehinderung, infolge derer sich der Hauptwerkstofffluss in die Richtung mit geringerem Widerstand bewegt.

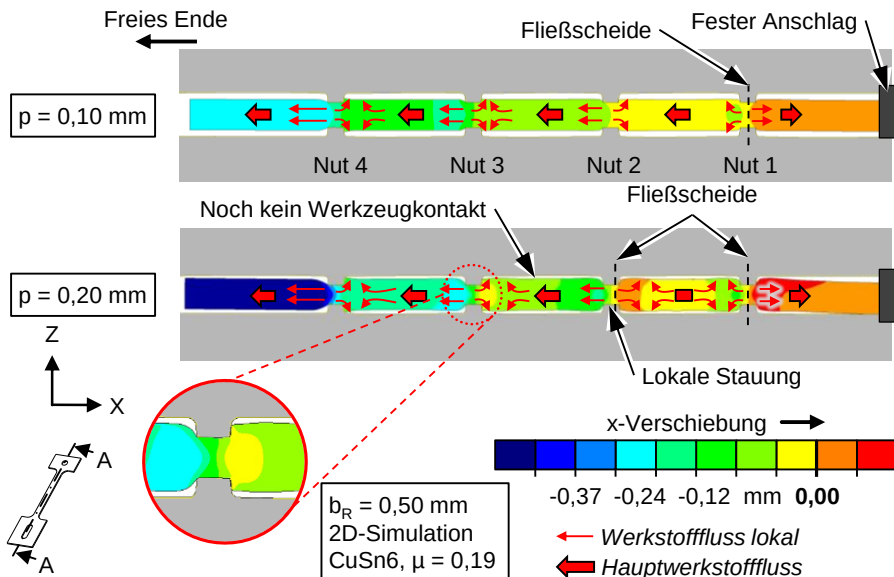


Bild 70: Verschiebung des Werkstoffs entlang der x-Achse

Es stellt sich ein Gleichgewicht der Fließbehinderungen einerseits durch den Festanschlag und andererseits durch die Summierung der Fließwiderständen an den Nuten 2 bis 4 ein. Daraus resultiert, dass eine Fließscheide für den Hauptwerkstofffluss an Nut 1 entsteht. Die geringe Fließbehinderung am freien Ende wirkt zunächst über alle Nuten. Durch das Ungleichgewicht der Fließbehinderung entsteht dadurch ein stärkerer Stofffluss in die negative x-Richtung. Mit weiterem Eindringen der Rippen wird zunächst die Werkstoffverschiebung durch den verdrängten Werkstoff verstärkt. Mit kleiner werdendem Spalt zwischen den Stirnflächen der Rippen erhöht sich jedoch der Staudruck und somit der Fließwiderstand an den Nuten. Dies führt dazu, dass an Nut 2 die Fließbehinderung größer ist als der Druck des verdrängten Werkstoffs durch Nut 1 und 2. Dadurch kommt es zu einer lokalen Aufstauung des Werkstoffs und es bildet sich eine weitere Fließscheide an Nut 2 aus. Wie mit den Pfeilen angedeutet, führt das Stauchen an den Nuten zu einem dem Hauptstofffluss entgegengesetzten lokalen Stofffluss, was in einem einseitigen Anstauen des Werkstoffs resultiert. Der Werkstoff wird zunehmend aus der Blechebene nach oben und unten verdrängt, was ein Aufdicken des Einlegers an den Nuten wie in Bild 71 bewirkt.

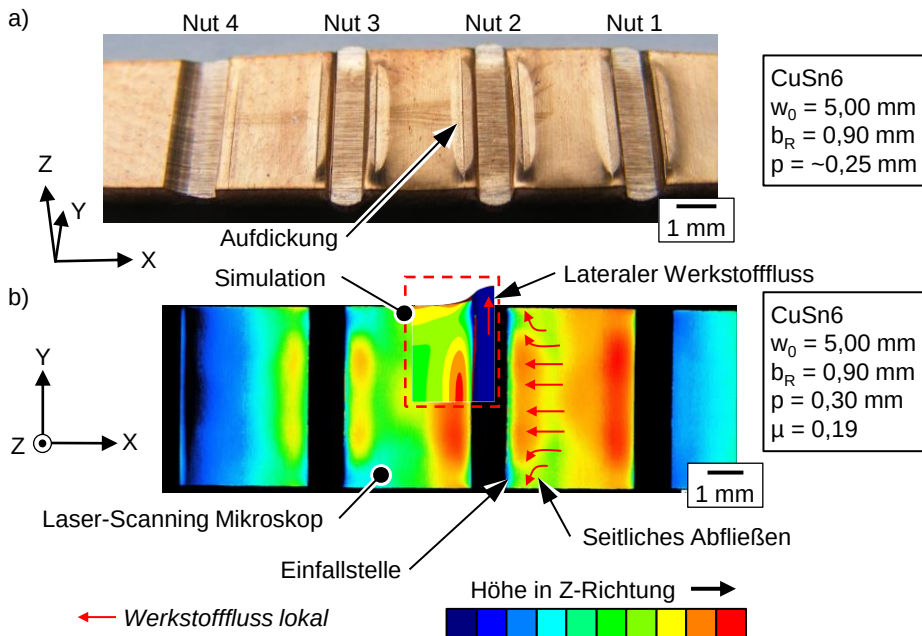


Bild 71: a) Geprägte Probe und b) Vergleich aus Höhenbild der Probenoberfläche und der Simulation

Gleichzeitig summieren sich die Verschiebungen des verdrängten Werkstoffs gleicher Richtung auf. Folglich ist der Flankenwinkel am freien Ende um $21,7^\circ$ für $b_R = 0,50$ mm und um $18,0^\circ$ für $b_R = 0,90$ mm größer als der für den Flachstauchversuch nach Gleichung (12) errechnete Wert. Für einen offenen Prägeprozess folgt daraus, dass in Abhängigkeit der Rippenbreite und der Blechdicke der resultierende Flankenwinkel bestimmt wird. Eine ideal rechteckige Nutform ist ohne weitere Maßnahmen nicht herstellbar. Prozessbedingt ist die resultierende Nutform zunächst trapezförmig selbst bei rechteckiger Rippenform. Eine trapezförmige Nutform mit steilen Flanken und somit kleinem Flankenwinkel ist nur für kleine Rippenbreiten bezogen auf die Blechdicke realisierbar. Die Anordnung mehrere Nuten nebeneinander in Kombination mit einem starken axialen Werkstofffluss in der Blechebene führt zu einer unsymmetrischen Nutform.

In Untersuchungen zum Prägen im geschlossenem Gesenk wurde in [107] und [113] mittels unterschiedlicher Methoden eine vollständige Wandanlage der Probe vor dem Prägeprozesses erreicht, wodurch der Werkstofffluss in der Blechebene unterbunden wird. Dadurch wurde eine gleichmäßige Abbildung der Prägegeometrie erreicht. Dies lässt sich auf den vorliegenden offenen Prägeprozess jedoch nicht übertragen. Der axiale Werkstofffluss in der Blechebene lässt sich bis zu einem bestimmten Grad hemmen, allerdings setzt dann verstärkt ein laterales Abfließen des Werkstoffs in y -Richtung wie in Bild 71 ein. Anhand der Aufdickung des Einlegers an den Nuten in Bild 71 a), welche sich über den Mittenbereich ausgehend von der Längsebene erstreckt, ist zu erkennen, dass zum Kantenbereich des Einlegers hin ein Wechsel der Stoffflussrichtung stattfindet. Es tritt ein lateraler Stofffluss direkt entlang der Stirnflächen der Rippen auf, was zu den charakteristischen, seitlichen Ausbauchungen führt. Dieser ist nahezu vollständig orthogonal zum axialen Werkstofffluss in y -Richtung orientiert. Dies führt dazu, dass mit zunehmenden y -Abstand zur Längsebene des Einlegers sich der axiale und der laterale Werkstofffluss überlagern und somit kein ebener Formänderungszustand mehr vorliegt. Die Überlagerung der beiden Stoffflussrichtungen führt dazu, dass Werkstoff, welcher sich an den Nutflanken aufstaut, seitlich abfließt und dadurch die Bildung einer Einfallstelle bewirkt. Das seitliche Abfließen ist durch Pfeile in Bild 71 b) schematisch dargestellt. Diese Formabweichung nimmt mit größerer Eindringtiefe zu. Da im Hinblick auf die Herstellung mediendichter Kunststoff-Metall-Hybridbauteile die Kontrolle der Einlegergeometrie von Bedeutung ist, werden im nachfolgenden Abschnitt die geometrischen Auswirkungen des axialen und lateralen Stoffflusses in Abhängigkeit der Einlegerbreite behandelt.

7.2.1 Resultierende Einlegergeometrie

Um die Auswirkung des Stoffflusses und der Fließbehinderung zu bewerten, werden die Makrogeometrie des Einlegers anhand der Länge und Breite analysiert. Nachfolgend sind die Längung Δl und die Breitung Δw in Abhängigkeit der Stempelbreite b_R , der Eindringtiefe p und der Stegbreite w_0 anhand von AlMg3 aufgetragen. Während die Längung den gesamten Einleger beschreibt und Einflüsse aller Nuten beinhaltet, ist die Breitung nur eine lokale Größe, die in Abhängigkeit der Nut variiert. Im weiteren Verlauf dient Nut 2 als Referenz für die Bewertung. Darüber hinaus ist in Bild 72 und in Bild 73 die Referenzstegbreite $w_0 = 5,0$ mm, auf die sich alle bisherigen Ergebnisse bezogen haben, markiert.

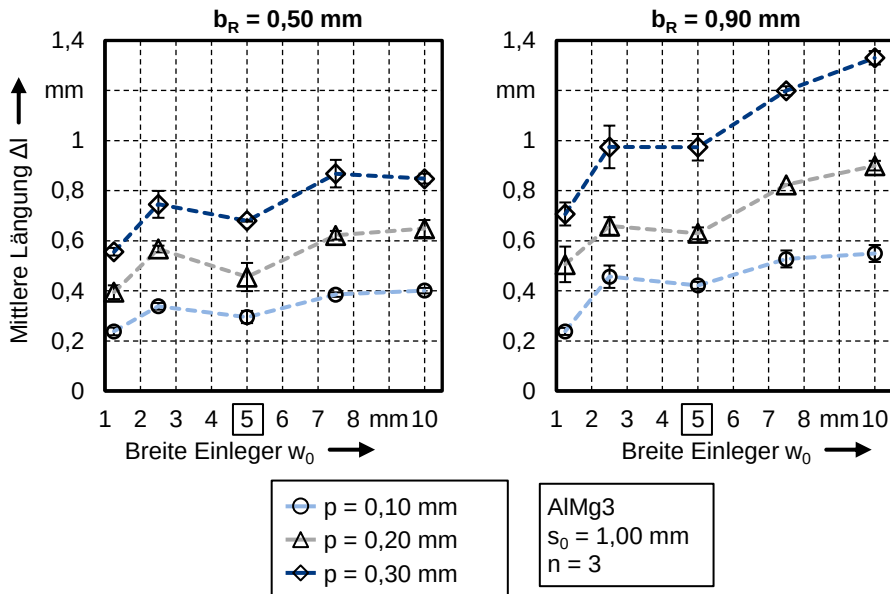


Bild 72: Längung in Abhängigkeit von Eindringtiefe, Rippen- und Einlegerbreite [156]

Es kann anhand von Bild 72 festgestellt werden, dass die Längung sowohl mit größerer Rippenbreite, als auch mit höherer Eindringtiefe zunimmt. Das bedeutet zunächst, dass die Längung mit dem Nutquerschnitt und somit erwartungsgemäß mit dem größeren verdrängten Volumen korreliert. Ebenfalls ist festzustellen, dass eine größere Einlegerbreite in beiden Diagrammen zu einer stärkeren Längung führt. Die lokale Breitung ist in Bild 73 exemplarisch anhand von Nut 2 dargestellt. Die aufgetragene Breitung weist in Bezug auf Rippenbreite und Eindringtiefe wie auch die Längung eine positive Korrelation auf. Mit größerer Eindringtiefe und größerer

Rippenbreite nimmt die Breitung zu. Im Gegensatz zur Längung, ist die Änderung der Breitung in Abhängigkeit der Einlegerbreite nahezu konstant. Dies gilt insbesondere für die Eindringtiefen $p = 0,10$ mm und $p = 0,20$ mm. Für diese Eindringtiefen besteht lediglich Kontakt zwischen den Rippen und dem Werkstück. Für die Eindringtiefe von $p = 0,30$ mm kommt es zu einem zusätzlichen flächigen Kontakt am Stempelboden. In diesem Zusammenhang werden, wie in Abschnitt 7.2 beschrieben, lokale Aufdickungen gestaucht. Je breiter der Einleger, desto mehr Werkstoffvolumen wird somit verdrängt, wodurch sich die zunehmende Breitung für die Rippenbreite $b_R = 0,90$ mm bei einer Eindringtiefe $p = 0,30$ mm erklären lässt.

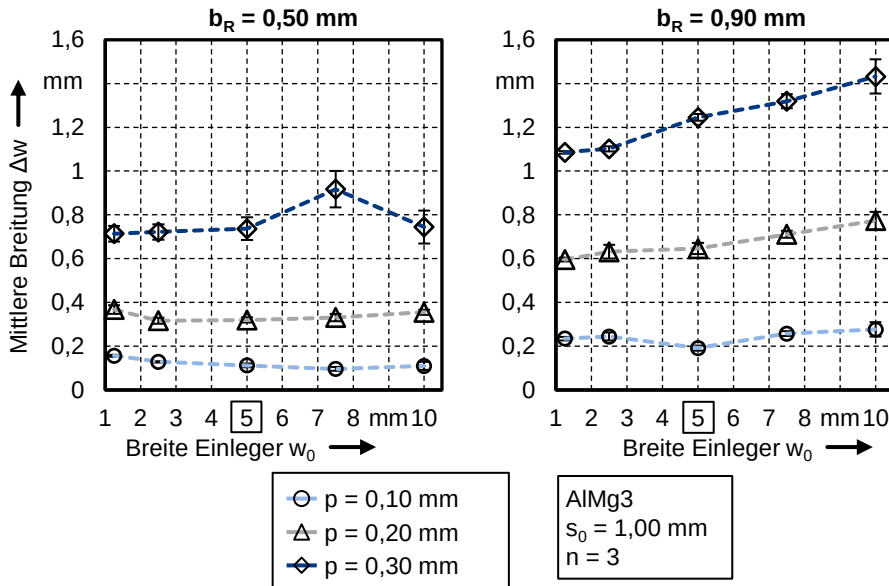


Bild 73: Breitung in Abhängigkeit von Eindringtiefe, Rippen- und Einlegerbreite [156]

Aus den Ergebnissen der Breitung in Bild 73 kann gefolgert werden, dass bei ausschließlich lokalem Kontakt der Rippen mit dem Werkstück, die absolute Breitung ein von der Einlegerbreite nur geringfügig beeinflusster Wert ist. Dieser Zusammenhang liegt auch dem Flachstauchversuch zugrunde, bei welchem der Anteil der Breitung bezogen auf die gesamte Umformung ab einem Breiten-Dicken-Verhältnis größer 6:1 vernachlässigt und eine ebener Formänderungszustand angenommen werden kann [131].

In Bezug auf die Auslegung geprägter Einleger für Kunststoff-Metall-Hybridbauteile folgt aus den Ergebnissen, dass die lokale Breitung vorrangig über die Eindringtiefe bestimmt somit dadurch gesteuert werden kann. Da

sich die Breitung weitestgehend unabhängig von der Einlegerbreite ist, kann das Vorgehen direkt auf unterschiedliche Einlegerbreiten übertragen werden. Gleichzeitig muss eine Kompensation der Längung in geeigneter Form in Abhängigkeit der Rippenbreite und Eindringtiefe bei der Auslegung der Einleger berücksichtigt werden.

7.2.2 Ausbildung der Kantengeometrie

Im Hinblick auf die Bauteileigenschaften und resultierenden Kantengeometrie soll nachfolgend auf die Ausbildung der Umformzone eingegangen werden. Dies wird exemplarisch anhand von Nut 2 erläutert. In Bild 74 sind die Ergebnisse aus Prägeversuchen in Form von geätzten Schliffbilder und Mikrohärtemessungen den Ergebnissen aus der Simulation für unterschiedliche Rippenbreiten gegenübergestellt. Zur einfacheren Vergleichbarkeit sind die Simulationsergebnisse der Kaltverfestigung und der Mikrohärtemessungen in Form der relativen Verfestigung in % bezogen auf die Differenz aus Ausgangszustand und Maximalwert angeben.

Für die Umformzone für die schmalste Rippe mit $b_R = 0,05$ mm ist ein deutlicher Unterschied gegenüber $b_R = 0,50$ mm und $0,90$ mm zu erkennen. Während für $b_R = 0,05$ mm sich die Umformzone auf oberflächennahe Bereiche konzentriert, erstreckt sich der plastifizierte Bereich für die beiden anderen Rippenbreiten über die gesamte Blechdicke. Dies spiegelt sich sowohl in den Schliffbildern an den durch die Ätzung eingefärbten Bereichen als auch in der Werteverteilung von Simulation und Härtemessung wider. Bei allen drei Varianten tritt die höchste Verfestigung im Kontaktbereich von Nut und Rippenkante auf. Dies entspricht auch dem Umformverhalten im Flachstauchversuch. Die Umformzonen für $b_R = 0,50$ mm und $0,90$ mm sind qualitativ ähnlich und entsprechen dem beim Stauchen typische Schmiedekreuz. Es zeigt sich, dass der Werkstoff direkt unter der Rippe kaum umgeformt wird, sondern sich die Umformung an den Grenzen des Druckkegels konzentriert [169]. Mit kleinerem Verhältnis von Blechdicke zu Rippenbreite s/b_R folgt eine zunehmende Überlappung der Gleitlinienfelder [130]. Folglich stellt sich wie beim Flachstauchversuch mit scharfkantigen Stempeln kein homogener Formänderungszustand ein [133]. Während für $b_R = 0,05$ mm keine und für $b_R = 0,50$ mm eine leichte Überlappung bei einer geringen Breite der Umformzone $b_{\text{Umformzone}}$ einstellt, konzentriert sich für $b_R = 0,90$ mm und einem s/b_R -Verhältnis von $0,89$ eine breite Umformzone in der Blechmittenebene.

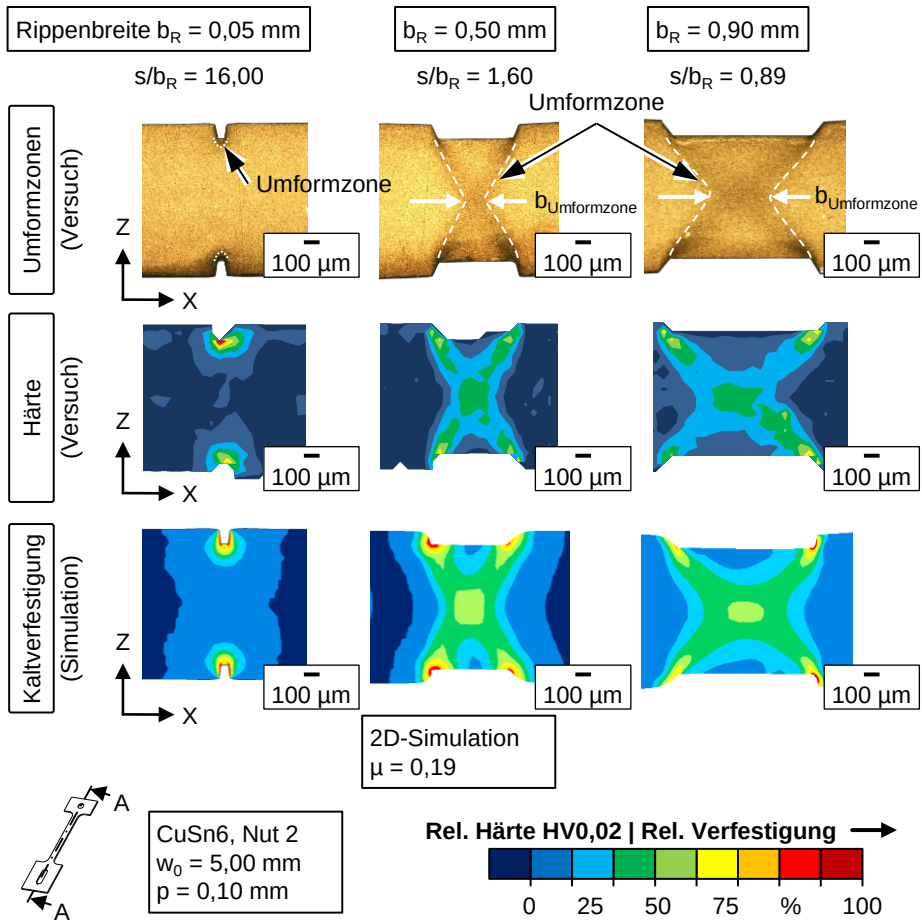


Bild 74: Vergleichende Darstellung für CuSn6 von geätzten Schlibbildern [167] sowie der Härte und [170] der Kaltverfestigung beide als relative Größe bezogen die Spannweite von unverfestigtem Initialzustand und Maximalwert

Anhand simulativer Ergebnisse der Verschiebung in y-Richtung in Bild 75 können die Vorgänge und die Auswirkung auf die Breitung sowie die Mikrogeometrie der Kante nachvollzogen werden. Hierfür wurde eine Achtel-Segment einer Nut als 3D-Simulation aufgebaut. Für die Rippenbreite $b_R = 0,05 \text{ mm}$ ist ein stark voreilender Stofffluss an der Oberfläche im Kontaktbereich zwischen Rippe und Blech zu erkennen. Dies entspricht dem Bereich der Umformzone in Bild 74. Für die Rippenbreiten $b_R = 0,50 \text{ mm}$ und $b_R = 0,90 \text{ mm}$ ist eine seitliche deutliche Verschiebung durch den lateralen Werkstofffluss über die gesamte Blechdicke zu erkennen. Für $b_R = 0,50 \text{ mm}$ ist ebenfalls eine voreilende, oberflächennahe Verschiebung

zu erkennen trotz der Überlappung der Umformzonen in der Blechmitte. Für eine Rippenbreite von $b_R = 0,90$ mm hingegen tritt ein Wechsel der Kantenform auf. Die Einlegerkante baucht nicht mehr oberflächennah, sondern in der der Blechmittelebene aus. Die deutlich größere Überlappung der Gleitlinienfelder und die Ausbildung einer ausgeprägten Umformzone führt zu einem verstärkten lateralen Werkstofffluss in der Blechebene.

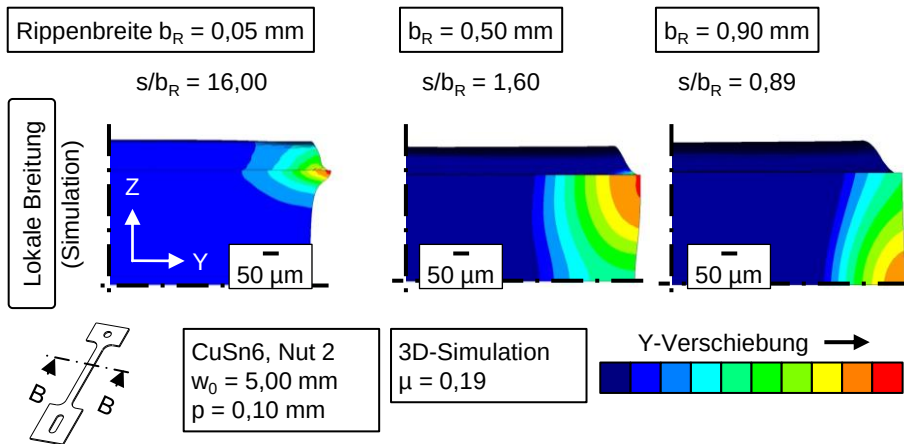


Bild 75: Breitung in Abhängigkeit der Rippenbreite [167]

Die anhand der Simulation beschriebenen Arten der Breitung können auch durch Höhenaufnahmen mittels Konfokalmikroskopie in Bild 76 experimentell bestätigt werden. Für die kleinste Rippenbreite $b_R = 0,05$ mm hierbei nochmals die sehr lokale, oberflächennahe Breitung deutlich, während der umliegende Werkstoff keine messbare Beeinflussung erfährt.

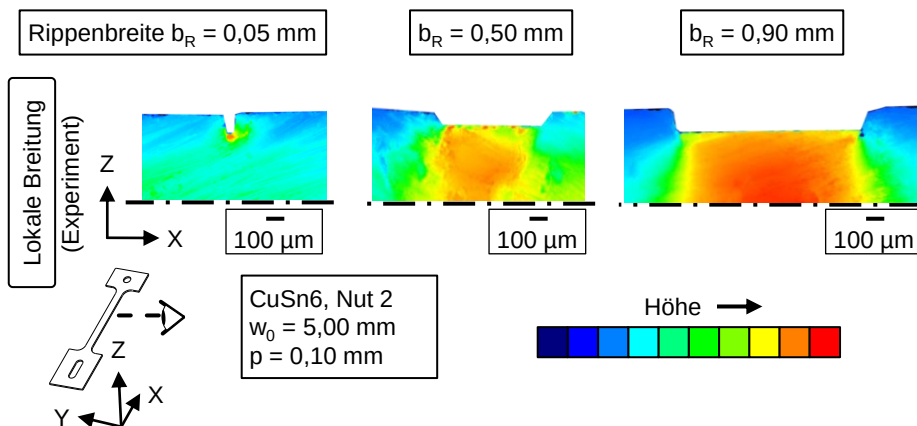


Bild 76: Konfokale Aufnahmen der Seitenansicht und Darstellung der Breitung

Im Hinblick auf den Montagespritzguss und die Dichtheit der Kunststoff-Metall-Hybridbauteile sind kleine Spalten und Risse kritisch, da hierdurch Leckagepfade entstehen können, welche die Dichtheit negativ beeinflussen. Der Wechsel des Mechanismus für den Ort der maximalen Breitung wirkt sich demnach auf die resultierende Mikrogeometrie der Kante aus. Entsprechend Bild 77 kann eine Vertiefung auftreten, welche beim umspritzten Bauteil nach dem Aufschwinden des Kunststoffs als Spalt verbleibt und somit einen möglichen Leckagepfad darstellt.

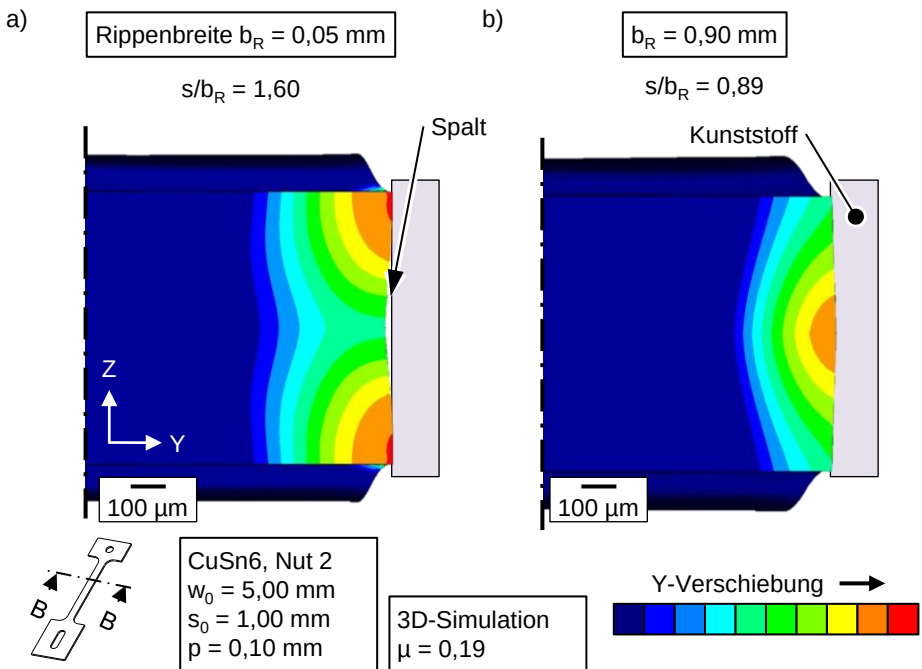


Bild 77: Mikrogeometrie der Kante infolge der lokalen Breite für eine Rippenbreite a) $b_R = 0,50 \text{ mm}$ und b) $b_R = 0,90 \text{ mm}$

Bei einer maximalen Ausbauchung in der Blechmitte hingegen kann der Kunststoff gleichmäßig aufschwinden. Da die Überlappung des Gleitlinienfelds bzw. der Umformzone vom Verhältnis von Blechdicke und Rippenbreite s/b_R abhängt, muss dies bei der Auslegung der Strukturierung für Kunststoff-Metall-Hybridbauteile beachtet werden. Der Übergangsbereich liegt zwischen $s/b_R = 0,89$ und $1,60$. Für die resultierende Kantenform ist jedoch nicht nur das temporäre s/b_R -Verhältnis entscheidend, sondern auch das initiale s_0/b_R -Verhältnis, bei welchem die Ausgangsblechdicke s_0 berücksichtigt wird.

7.2.3 Prozesskräfte

Um die Auswirkung der Rippenbreite auf die Prozesskraft (Bild 78 a) zu bewerten, wird eine normierte Darstellungsweise der Geometrie und der Kraft eingeführt. Hierfür werden Skalierungsfaktoren für die Rippenbreite und die zugehörige Prozesskraft bei einer bestimmten Prägetiefe auf die Werte der größten Rippenbreite $b_R = 0,90 \text{ mm}$ bezogen in der Form

$$S_{\text{Geometrie}} = \frac{b_R}{0,90 \text{ mm}} \quad (13)$$

sowie

$$S_{\text{Kraft}} = \frac{F(b_R, p)}{F(0,90 \text{ mm}, p)} \quad (14)$$

Damit lässt sich das Verhältnis der Skalierung von Kraft und Geometrie durch den Quotienten $S_{\text{Kraft}}/S_{\text{Geometrie}}$ ausdrücken, womit die Prozesskräfte in vergleichbarer Weise dargestellt werden. Für die Prägetiefe $p = 0,10 \text{ mm}$ ist das Verhältnis in Bild 78 b) für beide Werkstoffe auf Basis experimenteller Daten aufgetragen.

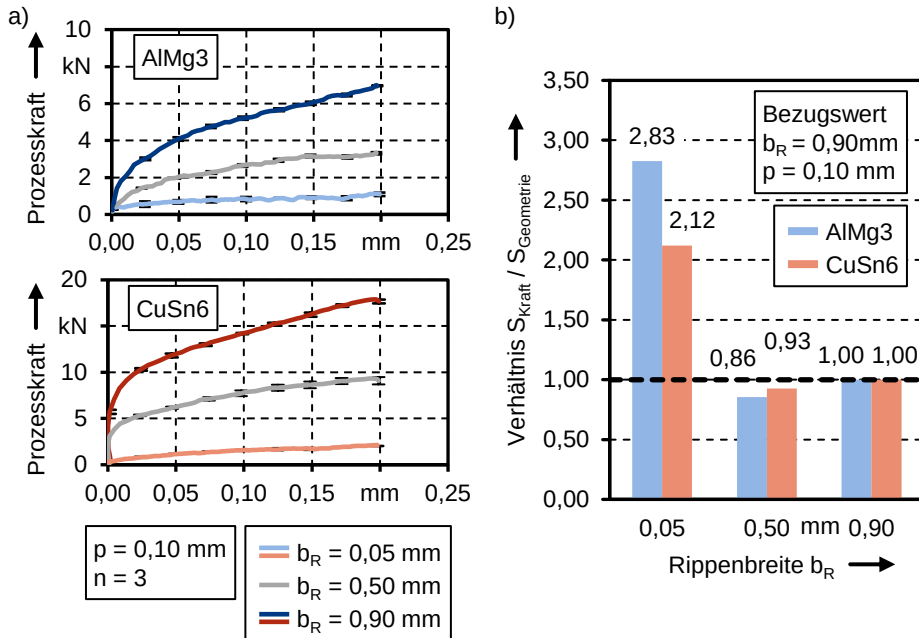


Bild 78: a) Prozesskräfte und b) Verhältnis der Skalierungsfaktoren von Geometrie und Kraft in Abhängigkeit der Rippenbreite [167]

Für die Rippenbreite $b_R = 0,90$ mm ergibt sich als Referenzwert 1,0. Wie zuvor beschrieben, ist auch für eine Rippenbreite von $b_R = 0,50$ mm eine deutliche Abweichung des resultierenden Flankenwinkels und der Werkzeuggeometrie zu erwarten. Das abgeleitete Kraftverhältnis liegt mit Werten von 0,86 für AlMg3 und 0,93 für CuSn6 in der Größenordnung von eins. Dadurch wird bestätigt, dass an sich die gleiche Prozesscharakteristik vorliegt und die Umformung im Wesentlichen durch eine Werkstoffstauchung zwischen den Stirnflächen der Rippen bestimmt wird. Für die kleinste Rippenbreite $b_R = 0,05$ mm im Versuchsfeld ergeben sich jedoch Abweichungen, welche mit Werten von 2,83 für AlMg3 und 2,21 für CuSn6 wesentlich größer sind als der Referenzwert und bedeuten, dass ein mehr als doppelte so großer Kraftbedarf für die Umformung notwendig ist.

Aufgrund der geringen Abmessung der Rippenbreite von 0,05 mm würde eine Begründung des abweichenden Kraftbedarfs durch Größeneffekte [171], welche aus der Mikroumformtechnik bekannt sind, naheliegen. Im vorliegenden Fall wäre von Einflüssen durch Größeneffekten des Werkstoffs und der Reibung auszugehen. Im Hinblick auf den Werkstoff und die Werkstückabmessungen würden Größeneffekte auf die Fließspannung durch die Korngröße sowie den Anteil der Randkörner bestimmt [172]. Da jedoch bei allen Versuchen und Rippenbreiten der Werkstoff und Werkstückabmessung gleich sind, kann nicht von einem Einfluss der Korngröße auf die Mikroumformung auf Basis der Hall-Petch-Beziehung [173] oder des Randschichtmodells [172] ausgegangen werden. Zumal in Untersuchungen zu skalierten Stauchversuchen von Kupferlegierungen [171] und skalierten Flachstauchversuche von Reinkupfer [174] eine Abnahme der Fließspannung bei einer Verkleinerung der Probenabmessung nachgewiesen wurden. Daraus würde somit bei einem nach unten skalierten Prozesse ein geringerer Kraftbedarf für die Umformung folgen. Dies steht jedoch im Widerspruch zum mehr als doppelte so hohen Kraftbedarf für den Nutprägeprozess bei $b_R = 0,05$ mm in Bild 78 b). Das bedeutet, dass keine werkstoffbezogenen Größeneffekte vorliegen.

Größeneffekte in Bezug auf die Reibung in Verbindung mit flüssigem Schmierstoff werden auf den größeren Anteil offener Schmiertaschen bei kleiner Skalierung zurückgeführt [171]. Dies äußert sich durch die Zunahme der Reibung bei der Miniaturisierung von Prozessen. Gleichzeitig setzt dieser Ansatz, der auf dem mechanisch-rheologischen Modell [175] basiert, hydrostatisch und hydrodynamischen Wirkmechanismen voraus. Bei der Umformung ohne Schmierstoff oder mit Festschmierstoff hingegen treten keine Größeneffekte der Reibung auf [171]. Da der vorliegende Nutpräge-

prozess schmierstofffrei ist, kann geschlossen werden, dass keine Größeneffekten der Reibung im Zusammenhang mit Schmiertaschen wirken, wodurch der erhöhte Kraftbedarf die Rippenbreite $b_R = 0,05 \text{ mm}$ erklärt werden könnte.

Eine Erklärung für den erhöhten Kraftbedarf findet sich im Zusammenhang mit den Geometrieverhältnissen aus Blechdicke und Rippenbreite s/b_R , wovon der resultierende Flankenwinkel der Nut abhängt. Anhand von Bild 69 nimmt die relative Flankenwinkelabweichung mit der Rippenbreite ab und liegt für $b_R = 0,05 \text{ mm}$ für alle vier Nuten in einem engen Bereich um Null. Wie in Bild 79 anhand von Simulationsergebnissen exemplarisch dargestellt, liegt aufgrund der Trapezform der Rippe für $b_R = 0,05 \text{ mm}$ der Werkstoff an den Seitenflächen an, was anhand der Reibspannungen ersichtlich ist. Für $b_R = 0,90 \text{ mm}$ tritt hingegen nur Reibung an der Stirnfläche der Rippe auf.

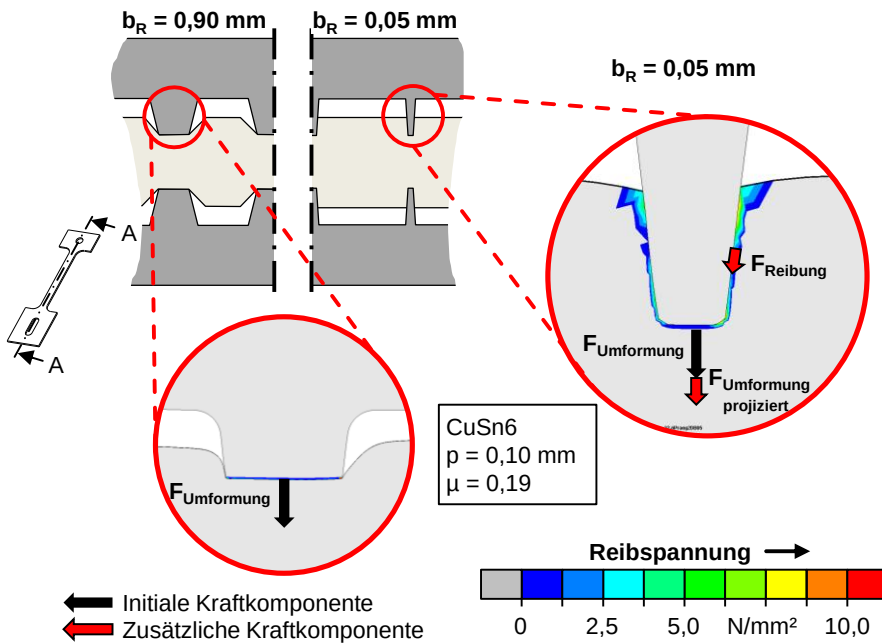


Bild 79: Schematische Darstellung der Kraftkomponenten beim Nutprägen

Der Kontakt zwischen der Seitenfläche der Rippe und dem Werkstück führt neben der zusätzlichen Reibkraft auch zu einer Umformung des Werkstoffs infolge des Flankenwinkels und der sich vergrößernden Projektionsfläche bei zunehmender Eindringtiefe. Aufgrund der Vergrößerung der projizierten Fläche der Rippen nimmt der Kraftbedarf mit der Eindring-

tiefe zu. In Bild 79 sind die Kraftkomponenten schematisch dargestellt. Daher kann der erhöhte Kraftbedarf auf diese beiden Komponenten zurückgeführt, welche auf einem kleinen resultierenden Flankenwinkel beruhen und somit auf das Verhältnis aus Blechdicke und Rippenbreite s/b_R zurückzuführen sind.

7.3 Zusammenfassende Bewertung

Das Prägen von Quernuten im Sinne einer umlaufenden Labyrinthdichtung ist ein effizientes Verfahren zur Oberflächenstrukturierung metallischer Einleger für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile. Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen ist ein beidseitiger, simultaner Einprägeprozess mit offenem Gesenk von mehreren symmetrischen Quernuten ohne vollflächigen Werkzeugkontakt. Um ein grundlegendes Prozessverständnis zu schaffen, wurden anhand der vorliegenden Untersuchungen zentrale Aspekte des Prozesses analysiert mit besonderem Augenmerk auf dem Werkstofffluss und der resultierenden Abbildungsgenauigkeit. Beim Nutprägen traten zwei wesentliche Stoffflussrichtungen auf. Zum einen entsteht durch das Einprägen und den verdrängten Werkstoff ein globaler axialer Stofffluss in Richtung der Längsachse des Einlegers. Zum anderen tritt ein lokaler, lateraler Werkstofffluss an den einzelnen Nuten auf. Dieser bewirkt eine Geometrieänderung des Einlegers in Form einer Längung in axialer Richtung und lokaler Breitung an den jeweiligen Nuten in Form von Ausbauchungen. Aufgrund der Hintereinanderschaltung der Nuten ist die Längung durch die Summe des axialen Werkstoffflusses bestimmt. Die Breitung äußert sich lokal und variiert in Abhängigkeit der jeweils vorherrschenden Fließbehinderung. Drei wesentliche Mechanismen sind für diese Fließbehinderung verantwortlich:

- Entgegengesetzter Werkstofffluss
- Formschluss
- Reibung

Hierbei wird der entgegengesetzte Werkstofffluss aktiv durch die Umformung an andere Stelle hervorgerufen, während Formschluss und Reibung sich passiv ohne Geschwindigkeitsfeld in Form von Reaktionskräften äußern. In Bezug auf die Abbildungsgenauigkeit ist der resultierende Flankenwinkel der Nut die Größe, welche die größten Abweichungen aufweist. Der Flankenwinkel ist im Wesentlichen durch das Verhältnis aus Restblechdicke und Rippenbreite des Prägestempels s/b_R bestimmt. Große Werte für das s/b_R -Verhältnis sind mit einer höheren Abbildungsgenauigkeit verbunden, was eine geringe Flankenwinkelabweichung für schmale

und tiefe Nuten bedeutet. Aufgrund der Charakteristik des offenen Einprägeprozesses mit einem rechteckigen Stempel ist eine rechteckige Nutform nicht herstellbar oder nur mit zusätzlichen Maßnahmen zu erreichen. Darüber hinaus ist die Abbildungsgenauigkeit vom Grad der vorherrschenden Fließbehinderung abhängig.

Während der axiale Werkstofffluss wesentlichen Einfluss auf die Nutform hat, ist die lokale Breitung durch den lateralen Werkstofffluss bestimmt. Mit zunehmender Nutbreite und -tiefe nimmt die Breitung grundsätzlich durch das größere, verdrängte Volumen zu. Der Einfluss der Eindringtiefe beim Prägen ist dabei am stärksten. Darüber hinaus wird die Mikrogeometrie der Kante durch den lateralen Stofffluss beeinflusst. In Abhängigkeit des s/b_R -Verhältnisses kommt es entweder zu einem voreilenden lateralen Stofffluss an der Ober- und Unterseite des Blechs oder zu einem Ausbauchen in der Blechmittelebene. Für große s/b_R -Verhältnisse liegt der Mechanismus der oberflächennahe Breitung vor und für kleine s/b_R -Verhältnisse tritt ein Ausbauchen auf. Im Hinblick auf die Eigenschaften von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen zeigt sich, dass diese grundsätzlich mit geprägten Quernuten verbessert werden kann. Im Vergleich der Prägetiefen wurde eine höhere Leckagerate für Nuten mit einer Eindringtiefe von 0,30 mm festgestellt, was auf die damit verbundene stärkere lokale Breitung bzw. Ausbauchung zurückgeführt werden kann.

Aus den zusammengefassten Erkenntnissen lässt sich für das Nutprägen für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile das in Bild 80 dargestellte Prozessfenster in Abhängigkeit der Rippen- bzw. Nutbreite und der Eindringtiefe ableiten. Die Untergrenze hinsichtlich der Eindringtiefe stellt eine Mindestprägetiefe dar, welche größer sein muss als die Kanteneinzugshöhe aus dem Scherschneidprozess oder dem Eckradius durch das Kantenprägen. Erst dann ist eine Ausformung der Nut über die gesamte Einlegeroberfläche sichergestellt. Die Obergrenze der Eindringtiefe bezogen auf eine Blechdicke $s_0 = 1,00$ mm liegt bei $p = 0,30$ mm vor, da hier eine wesentliche Reduktion der Biegesteifigkeit und der Festigkeit des Einlegers vorliegt. Dies ist kritisch für die Handhabung und birgt die Gefahr des Ausknickens im Montagespritzgießprozess. Die Untergrenze bezüglich der Rippenbreite leitet sich aus der kritischen Werkzeugbelastung ab. Mit zunehmendem Aspektverhältnis erhöht sich die Belastung durch Querkräften auf die Rippen infolge des axialen Werkstoffflusses. Die Obergrenze der Rippenbreite wird durch das s/b_R -Verhältnis bestimmt, welches mitunter die lokale Breitung beeinflusst. Aus Untersuchungsergebnissen zur Dichtigkeit wurde die lokale Breitung als nachteiliger Aspekt abgeleitet, weshalb

diese begrenzt werden sollte. In Form des Farbverlaufs ist der Zusammenhang der Abbildungsgenauigkeit des Flankenwinkels dargestellt. Dessen Abbildungsgenauigkeit hängt neben der Rippenbreite und der Eindringtiefe auch vom s/b_R -Verhältnis ab. Dieses wird jedoch an dieser Stelle nur in begrenzter Form implizit erfasst.

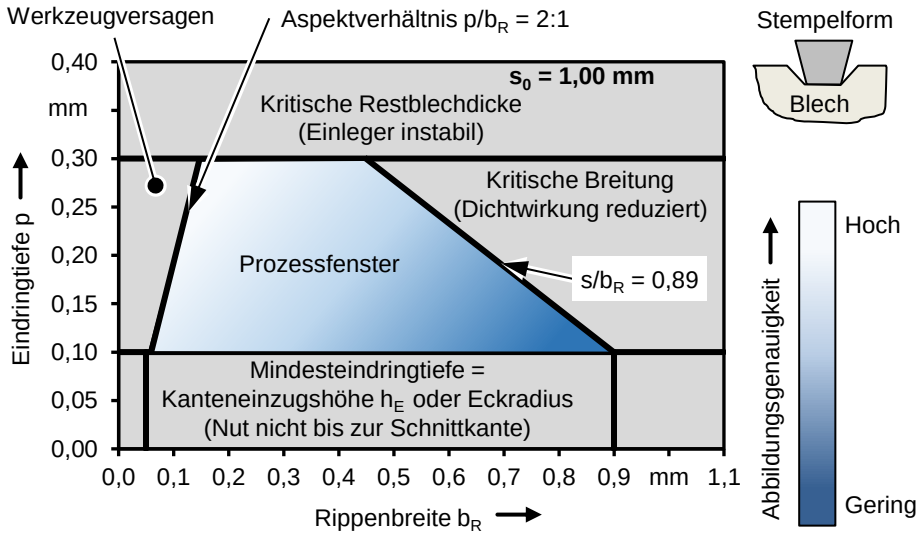


Bild 80: Prozessfenster für das Nutprägen

Der Nutprägeprozess ist hinsichtlich der Abbildungsgenauigkeit vorrangig durch die Blechdicke und die Werkzeuggeometrie bestimmt. Einflüsse durch den Werkstoff äußern sich in Form der Prozesskräfte und der Werkzeugbelastung. Daher behält das vorgestellte Prozessfenster auch für unterschiedliche Werkstoffe seine Gültigkeit, vorausgesetzt die kritische Werkzeugbelastung wird nicht überschritten. Darüber hinaus konnte in den Untersuchungen gezeigt werden, dass die Stegbreite des Einlegers nur einen sehr geringen Einfluss auf die Breitung hat, weshalb das vorgestellte Prozessfenster auch auf weitere Stegbreiten übertragen werden kann. Mit den vorgelegten Untersuchungen und dem abgeleiteten Prozessfenster wurde ein grundlegendes Prozessverständnis für das Nutprägen im offenen Gesenk erarbeitet. Damit wurde die Basis für die gezielte Auslegung von Strukturierungen für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile geschaffen.

8 Erhöhung der Dichtigkeit von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen mittels umformtechnisch strukturierter Einleger

Bei der Herstellung von mediendichten Kunststoff-Metall-Hybridbauteile ist die chemische Inkompatibilität eine große Herausforderung. Aufgrund der fehlenden Haftung kann es zu einer Spaltbildung zwischen Kunststoff und Metall kommen. Gleichzeitig führen die unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften und das Schwindungsverhalten des Kunststoffs zu Spannungskonzentrationen an scharfen Kanten, wodurch sich dort Risse bilden können. Infolgedessen können sich Leckagepfade bilden, über welche Feuchtigkeit eindringen kann. Es bestehen starke Wechselwirkungen zwischen der Gestaltung und Fertigung des metallischen Einlegers sowie dem anschließenden Umspritzprozess, welche die Dichteitseigenschaften des finalen Hybridbauteils bestimmen. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher das umformtechnische Verrunden scharfe Kanten und die Strukturierung der Einleger mittels Quernuten im Kontext eines Folgeverbundprozesses untersucht.

Der Ansatz des Kantenverrundens basiert darauf, dass die lokale Spannungskonzentration im Kunststoff an den Kanten des Einlegers reduziert werden. In Bild 81 sind numerische Untersuchungen der Spannungskonzentration in der Kunststoffkomponente dargestellt [35]. Ausgangspunkt der Simulation ist der resultierende Einlegerquerschnitt aus der Umformsimulation des Kantenprägens, um die prozessspezifische Geometrie der Kanten abzubilden.

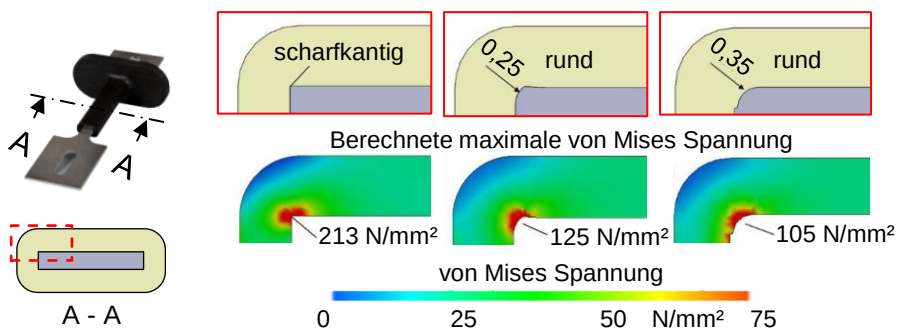


Bild 81: Spannungen im Kunststoff nach der Abkühlung von 150 °C [35]

Anhand des Vergleichs zwischen der scharfen und den verrundeten Kanten wird deutlich, dass sich bei Einlegern mit verrundeten Kanten die lokalen Spannungen im Kunststoff über einen größeren Bereich verteilen [35]. Infolgedessen nehmen die maximalen Spannungswerte mit größerem Kantenradius ab. Im Zusammenhang mit klimatischer Stressung durch Temperaturwechsel zwischen $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ wurde die Auswirkung der verrundeten Kanten auf die Dichtheit analysiert. Hierzu wurden Einleger mit einer Kantenverrundung von $R_1 = 0,25\text{ mm}$ und $R_1 = 0,35\text{ mm}$ mit scharfkantigen Einlegern als Referenz verglichen. Es wurde die Dichtheit der umspritzten Probekörpern mittels des Differenzdruckverfahrens bewertet und diese bei Überschreiten der Druckdifferenz von 20 mbar als undicht deklariert. Wie in Bild 82 dargestellt, wurde bei unbehandelten Einlegern mit scharfen Kanten bereits nach 10 Temperatur-Schock-Zyklen erste undichte Bauteile nachgewiesen. Nach 160 Zyklen wurden alle Bauteile ohne Kantenverrundung als undicht klassifiziert.

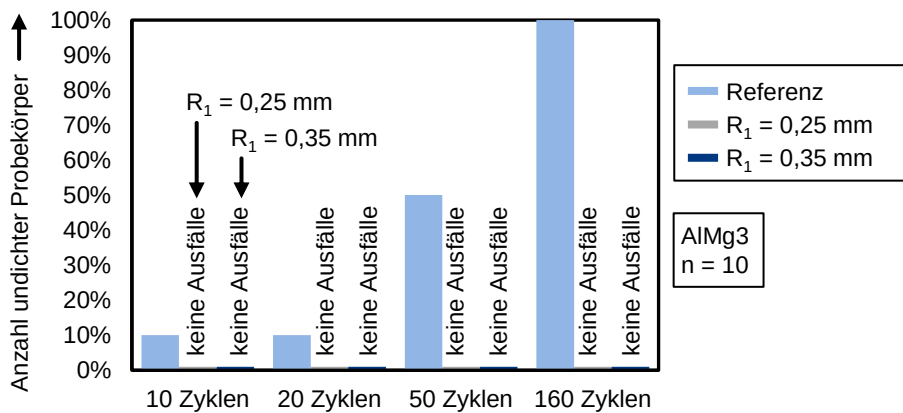


Bild 82: Dichtheit in Abhängigkeit unterschiedlicher Zyklusanzahlen einer Temperatur-Schock-Behandlung [34]

Im Gegensatz hierzu wurde bei Proben mit Kantenverrundung sowohl für $R_1 = 0,25\text{ mm}$ als auch für $R_1 = 0,35\text{ mm}$ im gleichen Untersuchungsrahmen keine Undichtheit festgestellt [34]. Dadurch wird deutlich, dass durch die Veränderung der Kantenform durch das Kantenprägen die Schädigung im Kunststoff reduziert wird und somit die Beständigkeit der Dichtheit verbessert werden kann. Dadurch wird das Potential des umformtechnischen Kantenverrundens metallischer Einleger im Rahmen eines Folgeverbundprozesses als effizientes Verfahren zur Verbesserung der Dichtheit von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen bestätigt.

Der Einfluss geprägte Quernuten auf die Dichtheit wurde ebenfalls anhand der Messung der Leckagerate bestimmt. Hierfür wurden umspritzte Probekörper sowohl mit dem Differenzdruckverfahren als auch mit dem Luft-unter-Wasser-Verfahren geprüft [36]. In Bild 83 sind die Ergebnisse der Prüfung ungeprägter Einleger als Referenz sowie von Einlegern mit Quernuten und einer Nutbreite von 0,50 mm bei unterschiedlicher Eindringtiefe dargestellt. Die Prüfung erfolgt nach dem Umspritzen ohne zusätzliche klimatische Stressung. Zur Bewertung der Dichtheit wurde als Bezugsgröße eine Leckagerate von 0,5 ml/min angegeben, was der Untergrenze des industriell üblichen Wertebereichs für Wasserdichtheit (0,5 - 12 ml/min) entspricht [176].

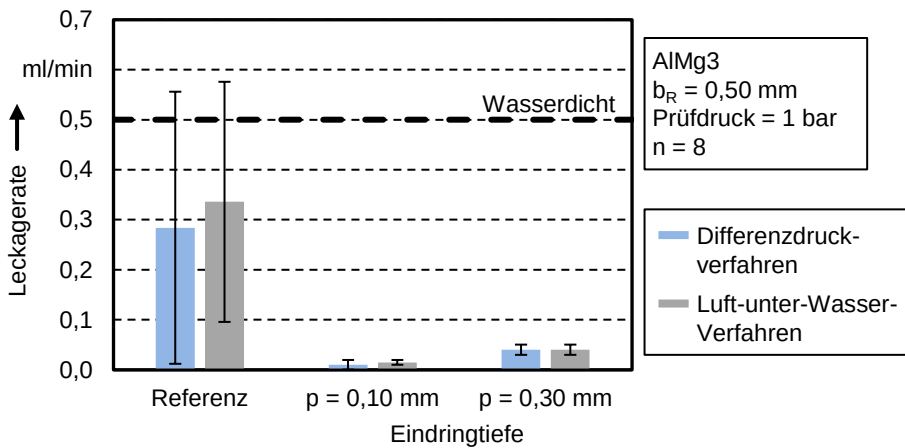


Bild 83: Leckagerate in Abhängigkeit der Strukturierung mit Quernuten, Auszug aus [36]

Für die unbehandelten Proben liegt die mittlere Leckagerate im Bereich von etwa 0,3 ml/min und liegt somit unter der gewählten Grenzleckagerate von 0,5 ml/min für die Wasserdichtheit. Allerdings sind die Messungen durch große Standardabweichungen gekennzeichnet. Das bedeutet, dass sowohl dichte als auch undichte Proben Bestandteil der untersuchten Stichproben sind und somit keine verlässliche Wasserdichtheit mit unbehandelten Proben sichergestellt werden kann. Im Gegensatz dazu sind die Leckageraten der Proben mit geprägten Nuten um ein Vielfaches geringer. Für eine Eindringtiefe von 0,10 mm liegt diese bei 0,012 ml/min und für eine Eindringtiefe von 0,30 mm bei 0,04 ml/min. Damit verbunden sind geringe Standardabweichungen, wodurch eine hohe Prozessstabilität und gute Reproduzierbarkeit dieser Fertigungsstrategie deutlich wird. Die Leckagerate nimmt bei einer größeren Eindringtiefe zu. Anhand der Untersuchungen in [36] kann dies auf die stärkere lokale Breitung zurückgeführt werden.

Daher sind Einleger mit geringerer Nuttiefe vorzuziehen. Darüber hinaus kommt es beim Abkühlen des Kunststoffs sowohl zu einem Aufschwinden des Kunststoffs auf den Einleger als auch zu einer Volumenschwindung, welche dem Aufschwinden entgegengesetzt ist. Dies kann es zu einem Abheben des Kunststoffs und somit zur Bildung von Spalten zwischen Kunststoff und Einleger führen. Daraus folgt, dass Nuten im Sinne einer Labyrinthdichtung so tief sein müssen, dass es nach dem Schwinden immer noch eine Überdeckung der Kunststoffkomponente und der geprägten Nut gibt [36]. Für die Herstellung metallische Einleger sind die Prozesskonfigurationen und Nutgeometrie so zu wählen, dass diese nur eine geringe seitliche Ausbauchung bewirken, was tendenziell mit einer kleineren Eindringtiefe und geringer Nutbreite verbunden ist. Daraus leitet sich die entsprechende Begrenzung des Prozessfensters des Nutprägens in Abschnitt 7.3 ab.

Anhand der dargelegten Messungen wird der Einfluss der gezielten Auslegung der metallischen Einleger auf die resultierenden Dichtheitseigenschaften von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen deutlich. Mit den Ergebnissen kann gezeigt werden, dass die Integration umformtechnischer Maßnahmen zur Strukturierung in einem Folgeverbundprozess ein geeignetes Verfahren für die effiziente Produktion angepasster Einleger ist. Damit kann ein wesentlicher Beitrag zur Erhöhung der Widerstandsfähigkeit elektronischer Systeme geleistet werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Herstellung mediendichter Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen im Montagespritzgießprozess gewinnt als kosteneffizientes, serientaugliches Verfahren durch den wachsenden Anteil elektronischer und mechatronischer Systeme seit Jahren an Bedeutung. Die Komponenten werden oft für sicherheitsrelevante Systeme eingesetzt, weshalb höchste Anforderungen hinsichtlich Zuverlässigkeit und Ausfallsicherheit vorliegen. Gleichzeitig sind diese häufig anspruchsvollen thermischen und mechanischen Belastungen sowie Medien wie Wasser und Öl ausgesetzt. Infolgedessen kann es zur Spalt- und/oder Rissbildung zwischen dem metallischen Einleger und dem Kunststoff kommen. Dadurch kann Feuchtigkeit in die Baugruppe eindringen und unter Umständen zum Ausfall des elektronischen Systems führen. Der Einsatz von strukturierten, metallischen Einlegern hat ein großes Potential die Dichtheit von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen zu steigern. Bisher ist allerdings unbekannt, welche geometrischen Eigenschaften ein Einleger haben sollte, um die Dichtheit zu steigern und welche Mechanismen zur einer Leckage führen. Des Weiteren muss erarbeitet werden, wie strukturierte Einleger zielgerichtet produziert werden können. Daher war das übergeordnete Ziel der wissenschaftlichen Untersuchungen im Spannungsfeld zwischen technologischen Anforderungen und fertigungstechnischen Möglichkeiten ein Verständnis für die Herstellbarkeit strukturierte Einleger aufzubauen und die Prozessgrenzen zu identifizieren. Den Untersuchungen lagen zwei zentrale Prämissen zugrunde, welche im weiteren Verlauf weiterverfolgt werden sollten. Einerseits wurde angestrebt, durch ein Kantenverrunden die Leckage infolge von Rissbildung im Vergleich zu scharfkantigen Einlegern zu reduzieren und die Beständigkeit der Dichtwirkung zu erhöhen. Für das Kantenverrunden wurde ein umformtechnischer Prägeprozess ausgewählt. Andererseits sollten gezielt Nuten in den Einleger eingebracht werden, um für die Kunststoff-Metall-Hybridbauteile die Dichtheit nachhaltig zu verbessern. Für die Herstellung dieser Strukturen wurde ein Nutprägeprozess konzipiert. Im Hinblick auf eine effiziente Fertigung werden die beiden Prägeprozesse zusammen mit Scherschneidoperationen im Kontext eines Folgeverbundwerkzeugs untersucht.

Um die Wechselwirkungen der umformenden Prozesse und deren Auswirkungen auf die finale Strukturierung zu ermitteln, wurde zunächst ein Werkzeugkonzept erarbeitet, mit welchem es möglich ist, den Prozess bestehend aus Scherschneiden, Kanten- und Nutenprägen grundlegend und

ganzheitlich zu analysieren. Durch den modularen Aufbau ist es insbesondere möglich, die Bauteilgeometrie für die systematischen Analysen gezielt zu variieren. Verbunden mit einer guten Zugänglichkeit können die Einzelprozesse sowohl im Folgeverbund als auch einzeln auf einer Universalprüfmaschine bewertet werden.

Mit Hilfe des erarbeiteten Werkzeugkonzepts war es anschließend möglich, das Kantenprägen mit offenem Gesenk für das umformtechnische Verformen von metallischen Einlegern zu qualifizieren. In diesem Zusammenhang konnte die Querschnittsfläche des Einlegers als wichtigste Einflussgröße auf die Formfüllung und damit auf die Abbildungsgenauigkeit identifiziert werden. Gleichzeitig konnte im Rahmen der grundlagenwissenschaftlichen Untersuchungen abgeleitet werden, dass die Blechdickentoleranz, insbesondere bei zunehmender Stegbreite der Einleger, bei der Auslegung des Prozesses berücksichtigt werden muss. Zusammenfassend dominieren die geometrischen Eigenschaften während des Kantenprägens die Genauigkeit des Prozesses. Änderungen des Werkstoffes und dessen Eigenschaften können während der Umformung zwar detektiert werden, spielen für die Formfüllung aber nur eine untergeordnete Rolle. Der Einfluss des Werkstoffs äußert sich primär indirekt durch eine Änderung der Schnittkantengeometrie des Vorprozesses, was im Kontext eines Folgeverbunds zu beachten ist.

Neben der Anpassung der Kantengeometrie liegt der Fokus der wissenschaftlichen Untersuchungen auf dem Nutprägen und den Einflüssen auf die resultierende Nutgeometrie. Dadurch sollen grundlegende Erkenntnisse erarbeitet werden, um eine gezielte Beeinflussung der resultierenden Struktur zu ermöglichen. Durch eine Unterteilung des Werkstoffflusses in axialer und lateraler Richtung war es möglich, ein ganzheitliches Verständnis hinsichtlich der Ausformung der Nuten sowie der Längung und Breitung der Einleger aufzubauen. Gerade die Breitung wird in diesem Zusammenhang durch die vorherrschenden Fließbehinderungen stark beeinflusst. Diese können nach dem zugrundeliegenden Mechanismus in die Wirkweise eingeteilt werden. Daraus ergeben sich die Klassen „Entgegengesetzter Werkstofffluss“ als aktive Fließbehinderung sowie „Formschluss“ und „Reibung“ als passive Fließbehinderungen. Der resultierende Flankenwinkel wurde als wichtiges Charakteristikum für die Abbildungsgenauigkeit identifiziert, welcher im Wesentlichen durch das s/b_R -Verhältnis aus Restblechdicke und Rippenbreite des Prägestempels bestimmt ist. Aus den erarbeiteten Erkenntnissen wurde final ein Prozessfenster abgeleitet, welches die Herstellbarkeit in Abhängigkeit der Rippenbreite und der Eindringtiefe beschreibt. Das Prozessfenster wird dabei durch die kritische

Breitung, die kritische Restblechdicke, Werkzeugversagen sowie einer notwendigen Mindesteindringtiefe begrenzt. Durch das erarbeitete Prozessfenster werden schließlich die wichtigsten Grundlagen für die gezielte Auslegung von strukturierten Einlegern für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile gelegt.

Im abschließenden Kapitel wurden die Auswirkungen der umformtechnischen Anpassung der Einleger in Form des Kantenprägens und des Nutprägens auf die finalen Dichtheitseigenschaften von Kunststoff-Metall-Hybridbauteile dargelegt. Es konnte gezeigt werden, dass im Vergleich zu unbehandelten, scharfkantigen Einleger der Einsatz verrundeter Kanten die Beständigkeit der Dichtwirkung des Kunststoff-Metall-Verbunds erhöhen kann. Durch den Einsatz einer umformtechnischen Strukturierung mittels Quernuten konnte eine Reduktion der Leckagerate um mehr als eine Größenordnung im Vergleich zu unstrukturierten Einlegern erreicht werden. Mit den Ergebnissen wird das hohe Potential der umformtechnischen Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für die Erhöhung der Mediendichtheit von Kunststoff-Metall-Hybridbauteile nachgewiesen.

Zusammenfassend konnten durch die wissenschaftlichen Untersuchungen wichtige Erkenntnisse für die Herstellung von strukturierten Einlegern erarbeitet werden. Diese konnten dazu beitragen, die Dichtheit von Kunststoff-Metall-Verbindungen zu steigern. Auf Basis des aktuellen Erkenntnisstands ist eine weitere Verbesserung der Dichtheitseigenschaften im Zusammenhang mit geätzten, hinterschnittigen Strukturen möglich. Daher wäre die Herstellung von Hinterschnitten mittels Prägen eine zielführende Erweiterung der hier vorgestellten Ansätze und würde eine weitere Eigenschaftsverbesserung ermöglichen.

10 Summary and future work

The manufacturing of media-tight polymer-metal hybrid parts using assembly injection molding has been gaining in importance for years as a cost-efficient, high volume production process due to the growing demand of electronic and mechatronic systems. Hybrid components are used for safety-relevant systems, therefore a high level of reliability and fail-safety are required. At the same time, these systems are often exposed to thermal and mechanical loads as well as media such as water and oil. As a result, gaps and/or cracks can occur between the metal insert and the polymer. As a consequence, moisture can penetrate into the assembly and possibly lead to failure of the electronic system. The use of metal inserts with defined surface structure has a great potential to increase the tightness of polymer-metal hybrid components. However, it is not yet known which geometrical properties an insert should have to increase the tightness and which mechanisms lead to leakage. Furthermore, suitable methods must be developed in order to structure inserts in efficient manner. Therefore, the overall goal of the investigations was to acquire sound knowledge of the manufacturing of structured inserts and to identify the process limits considering the technological requirements of the inserts and the production capabilities. The investigations were based on two central premises, which were to be pursued in this work. On the one hand, there is the forming of rounded edges in an open coining process in order to reduce the leakage due to crack formation compared to sharp-edged inserts and to increase the durability of the sealing effect. On the other hand, there is the embossing of grooves in order to improve the long-term sealing effect of the polymer-metal hybrid components. To account for an efficient production, the two coining processes together with shearing operations are investigated in the context of a progressive die.

In order to determine the interactions of the forming processes and their effects on the final structuring, a tool concept was developed with which it is possible to analyze the process consisting of shearing, edge forming and groove embossing. The modular design makes it possible to vary the component geometry for the systematic process analysis. The different processes can be evaluated both in a progressive die setup and individually on a universal testing machine.

Based on the developed tool concept it was possible to qualify edge forming with an open die for the rounding of metal inserts. In this context, the cross section of the metal insert was identified as the most important influencing

variable on the die filling and thus on the forming accuracy. At the same time, the basic research has shown that the sheet thickness tolerance, especially with increasing width of the inserts, must be taken into account when designing the process. In summary, the geometrical properties of the insert during edge forming dominantly affect the accuracy of the process. Changes of the material and its mechanical properties have an effect on the forming process, but play only a minor role for the filling of the die. The influence of the material is expressed primarily indirectly by a change in the cutting edge geometry of the pre-process. This has to be considered for a progressive die process.

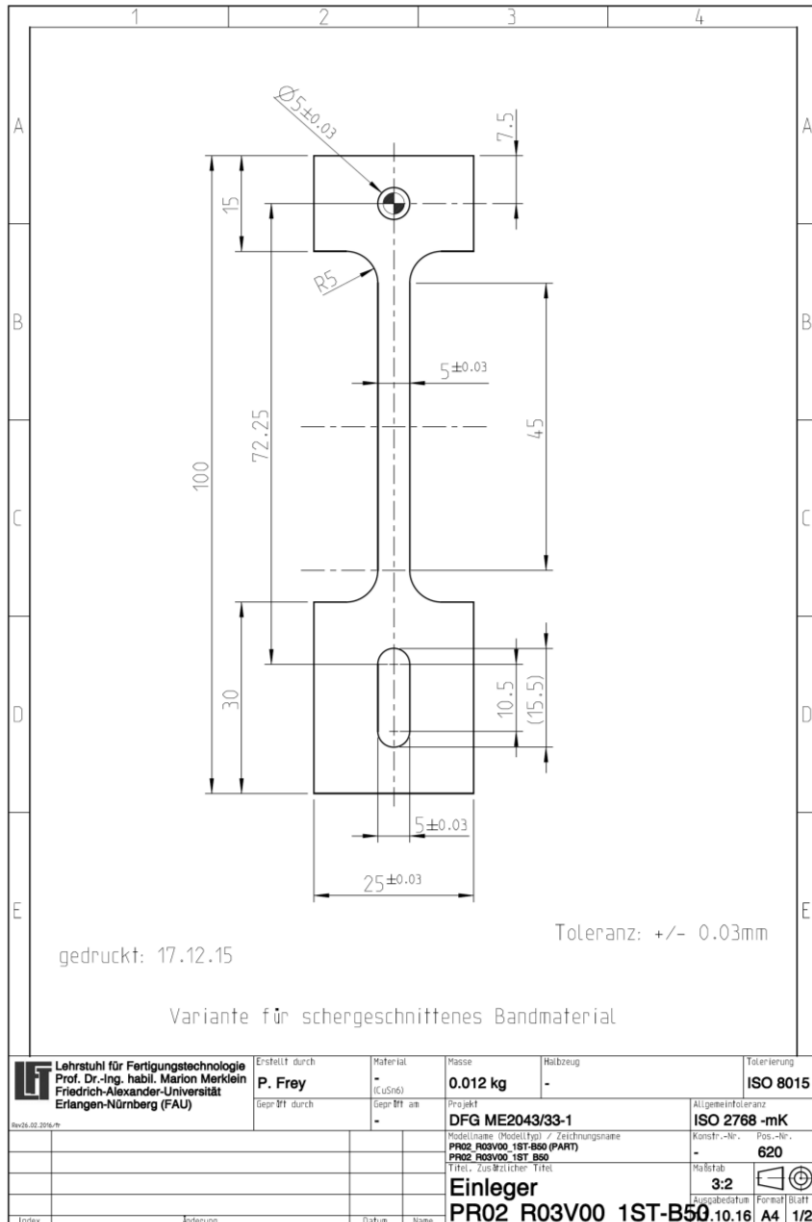
In addition to the rounding of the edge geometry, the focus of the investigations is on the embossing of grooves and the influences on the resulting groove geometry. Thereby, fundamental knowledge was gained to specifically influence the resulting structure. By examine the material flow in axial and in lateral direction it was possible to create a holistic understanding of the forming of the grooves as well as of the axial and lateral elongation of the inserts. Especially the lateral elongation is strongly influenced by predominant flow restrictions. These can be categorized based on the underlying mechanism. This results in the classes "opposite material flow" as an active flow restriction as well as "form-fit" and "friction" as passive flow restrictions. The resulting flank angle of the groove was identified as an important characteristic for the forming accuracy, which is mainly determined by the s/b_R ratio of residual sheet thickness and rib width of the embossing die. The findings were used to derive a process window which describes the producibility in relation to the rib width and the penetration depth. The process window is limited by the critical width, the critical resulting sheet thickness, tool failure and a necessary minimum penetration depth. The process window that has been derived builds the foundation for the tailored design of structured metal inserts for media-tight polymer-metal hybrid components.

In the final chapter, the effects of the edge forming and the embossed grooves on the final sealing properties of the polymer-metal hybrid parts are presented. It can be concluded that the usage of rounded edges can increase the durability of the sealing properties of the polymer-metal bond compared to untreated, sharp-edged inserts. The embossing of grooves reduces the leakage rate by more than one order of magnitude compared to unstructured inserts. The results demonstrate the high potential of embossing for structuring of metal inserts in a progressive die in order to increase the media tightness of polymer-metal hybrid components.

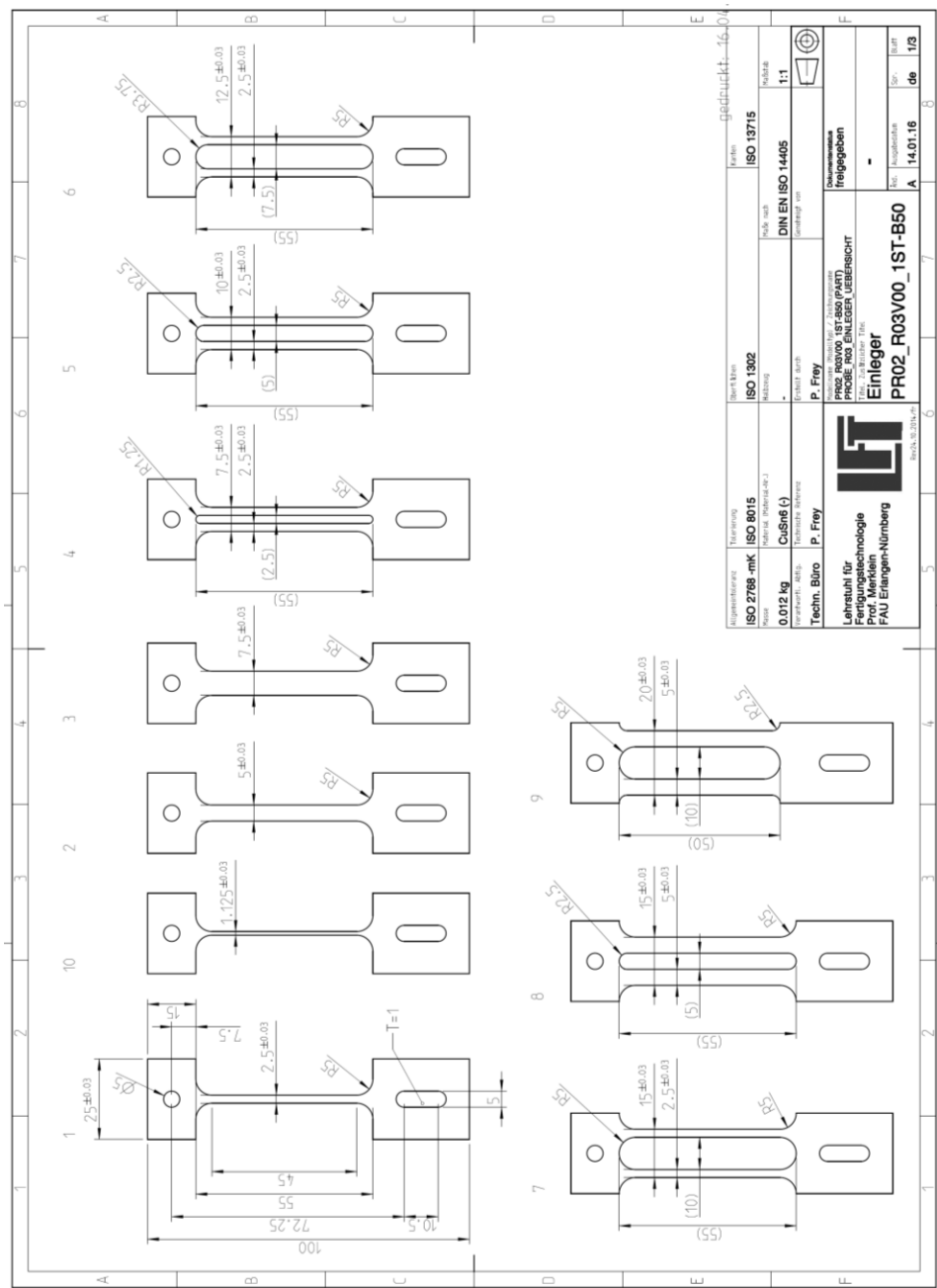
In summary, the investigations provided important findings for the manufacturing of structured inserts. These contribute to the enhancement of the media-tightness of metal-plastic hybrid parts. Based on the current state of the art, a further improvement of the sealing properties is possible for etched structures with micro undercuts. Therefore, the production of undercuts by means of embossing would be a consequent extension of the approaches presented and could foster a further improvement of sealing properties.

Anhang

Technische Zeichnung der verwendet Einlegergeometrie mit Toleranzen



Technische Zeichnung der Probenvarianten des modularen Folgeverbundwerkzeugs



Literaturverzeichnis

- [1] Spath, D.; Ganschar, O.; Gerlach, S.; Hämmerle, M.; Krause, T.; Schlund, S.: Produktionsarbeit der Zukunft - Industrie 4.0. Fraunhofer-Verlag, 2013
- [2] N.N.: Opportunities for the global semiconductor market. PwC - PricewaterhouseCoopers (Hrsg.), 2019, URL: <https://www.pwc.com/gx/en/industries/tmt/publications/global-tmt-semiconductor-report-2019.html>; [21.05.2019]
- [3] Schaefer, U.: Mikroelektronik – Trendanalyse bis 2023. ZVEI - Zentralverband Elektrotechnik- und Elektronikindustrie e. V. (Hrsg.), Frankfurt am Main, 2019
- [4] Schmidt, E.; Maier, R.; Pölloth, H.: Trends in der Aufbau- und Verbindungstechnik kontra Anforderungen im Automobil. In: VDI (Hrsg.): Tagungsband Baden-Baden Spezial: Fahrzeugelektronik im Fokus. VDI-Verlag, 2004, S. 55–64
- [5] Ridder, H.; Schnieders, J.: Hybridspritzgießen - Möglichkeiten und Grenzen. In: VDI (Hrsg.): Tagungsband VDI-Tagung Spritzgießen 2007. VDI-Verlag, 2007
- [6] Merklein, M.: Charakterisierung von Blechwerkstoffen für den Leichtbau. Meisenbach, 2006
- [7] Von Tils, V.: Design Requirements for Automotive Reliability - Vortrag: ESSDERC 2006 - 36th European Solid-State Device Research Conference, 2006
- [8] Reif, K.: Automobilelektronik - Eine Einführung für Ingenieure. Vieweg+Teubner, 2012, 4. Aufl.
- [9] Heinle, C.; Vetter, M.; Brocka-Krzeminska, Z.; Ehrenstein, G. W.; Drummer, D.: Mediendichte Materialverbunde in mechatronischen Systemen durch Montagespritzguss. J. Plast. Technol. 5(2009)6, S. 428–450
- [10] Zentgraf, T.: SKZ-Forschungsbericht: Mediendichtes Umspritzen von Einlegeteilen aus Metall und Keramik - AiF-Nr 16161 N, Würzburg, 2011

- [11] Bonpain, B.: Entwicklung und prozesstechnische Analyse eines festen und mediendichten Kunststoff - Metall - Verbundes - Dissertation. Technische Universität Dortmund, 2016
- [12] Ehrenstein, G. W.: Handbuch Kunststoff-Verbindungstechnik. Hanser, 2004, 1. Aufl.
- [13] Johannaber, F.; Michaeli, W.: Handbuch Spritzgießen. Hanser, 2004, 2. Aufl.
- [14] Heinle, M.: Montagespritzgießen von mechatronischen Komponenten. In: Drummer, D.: Technisch-wissenschaftlicher Bericht - Lehrstuhl für Kunststofftechnik. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), 2014
- [15] Ehrenstein, G. W.: Mit Kunststoffen konstruieren. Hanser, 2007, 3. Aufl.
- [16] Schuck, M.: Kompatibilitätsprinzipien beim Montagespritzgießen - Zugl: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2009. In: Drummer, D.: Technisch-wissenschaftlicher Bericht - Lehrstuhl für Kunststofftechnik. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), 2009
- [17] VDI 2860:1995-05: Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole.
- [18] Ehrenstein, G. W.; Amesöder, S.; Fernández Díaz, L.; Niemann, H.; Deventer, R.: Werkstoff- und prozessoptimierte Herstellung flächiger Kunststoff-Kunststoff und Kunststoff-Metall-Verbundbauteile. In: Geiger, M.; Ehrenstein, G. W. (Hrsg.): Robuste, verkürzte Prozessketten für flächige Leichtbauteile - Tagungsband zum Berichts- und Industriekolloquium des SFB 396, Erlangen, 15. - 16. Oktober 2003. Meisenbach, 2003
- [19] Drummer, D. (Hrsg.): Handbuch Kunststoff-Metall-Hybridtechnik. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU);, 2015
- [20] Schrick, K.; Stambke, M.; Bergmann, J. P.; Bräutigam, K.; Henckell, P.: Macroscopic Surface Structures for Polymer-metal Hybrid Joints Manufactured by Laser Based Thermal Joining. Physics Procedia 56(2014), S. 782-790
- [21] Habenicht, G.: Kleben - Grundlagen, Technologien, Anwendungen: VDI-Buch. Springer, 2009, 6., aktualisierte Aufl.

- [22] Roesner, A.; Scheik, S.; Olowinsky, A.; Gillner, A.; Reisgen, U.; Schleser, M.: Laser Assisted Joining of Plastic Metal Hybrids. *Physics Procedia* 12(2011), S. 370–377
- [23] Große-Bley, W.; Schröder, G.: Wie dicht ist dicht? oder: suchst Du noch oder misst Du schon? In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung; Jahrestagung Zerstörungsfreie Materialprüfung (Hrsg.). DGZfP, 2007, 91/1-91/5
- [24] DIN EN ISO 20484:2017-07: Zerstörungsfreie Prüfung – Dichtheitsprüfung – Begriffe.
- [25] Steinhilper, W.; Sauer, B.: *Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2*. Springer, 2006
- [26] Persson, B. N. J.; Yang, C.: Theory of the leak-rate of seals. *J. Phys.: Condens. Matter* 20(2008)31, S. 315011
- [27] Lorenz, B.; Persson, B. N. J.: Leak rate of seals: Effective-medium theory and comparison with experiment. *Eur. Phys. J. E* 31(2010)2, S. 159–167
- [28] Rotheiser, J.: *Joining of plastics - Handbook for designers and engineers*: Hanser eLibrary. Hanser, 2009, 3. ed.
- [29] Fedler, M.: Standards für die Dichtigkeiten beim Umspritzen von Einlegeteilen - *Firmenzeitschrift: K-Impulse*, 2006
- [30] Weckenmann, A. (Hrsg.): Abschlussbericht / DFG Sonderforschungsbereich 694 Integration Elektronischer Komponenten in Mobile Systeme - 01.01.2006 - 31.12.2010. Shaker:, 2010
- [31] Fedler, M.: Erreichbare Dichtigkeiten beim Umspritzen von Steckerkontakten. *KC-aktuell Kunststoff Cluster*, (2008)3, S. 4–5
- [32] Byskov-Nielsen, J.; Holm, A. H.; Højsholt, R.; Sá, P.; Balling, P.: Testing the permeability and corrosion resistance of micro-mechanically interlocked joints. *Appl. Phys. A* 104(2011)3, S. 975–979
- [33] Kleffel, T.; Drummer, D.: Electrochemical treatment of metal inserts for subsequent assembly injection molding of tight electronic systems. *Journal of Polymer Engineering* 38(2018)7, S. 675–684
- [34] Heinle, M.; Frey, P.; Merklein, M.; Drummer, D.: Einfluss mikrogeformter Kanten an Metalleinlegern auf die Temperaturwechselbeständigkeit mediendichter Kunststoff-Metall-Hybriden. *J. Plast. Technol.* 14(2018)3, S. 211–232

- [35] Frey, P.; Heinle, M.; Drummer, D.; Merklein, M.: Influence of Metal Inserts with Microformed Edges on Subsequent Injection Assembly Moulding for Media Tight Electronic Systems. In: Qin, Y.; Dean, T. A.; Lin, J.; Yuan, S. J.; Vollertsen, F. (Hrsg.): Proc. 4th International Conference on New Forming Technology (ICNFT 2015), 2015
- [36] Kleffel, T.; Frey, P.; Merklein, M.; Drummer, D.: Analysis of the formation of gap-based leakages in polymer-metal electronic systems with labyrinth seals. Journal of Polymer Engineering 39(2019)6, S. 573–586
- [37] Kolbe, M.; Hellwig, W.: Spanlose Fertigung Stanzen. Springer, 2015, 11. Aufl.
- [38] Hoffmann, H.; Neugebauer, R.; Spur, G. (Hrsg.): Handbuch Umformen. Hanser, 2012, 2. Aufl.
- [39] N.N.: Festhub, Kurbelantrieb (Sinus), Ultra-Highspeed. Yamada Dobby Co. Ltd. (Hrsg.), URL: <https://www.yamadadobby.com/de/omega.html>; [25.04.2020]
- [40] Hilbert, H. L.: Stanzereitechnik -Band 1: Schneidende Werkzeuge. Hanser, 1972, 6. Aufl.
- [41] DIN 8588:2013-08: Fertigungsverfahren Zerteilen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
- [42] Demmel, P.; Nothaft, K.; Golle, R.; Hoffmann, H.: Zerteilen. In: Hoffmann, H.; Neugebauer, R.; Spur, G. (Hrsg.): Handbuch Umformen. Hanser, 2012, S. 677–730
- [43] Kräusel, V.: Gestaltung und Bewertung einhubiger Scherschneidverfahren mit starren Werkzeugen unter besonderer Berücksichtigung der Schnittflächenqualität an Blechbauteilen: Berichte aus dem IWU, Bd. 76. Verl. Wissenschaftliche Scripten, 2013
- [44] Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik. Springer, 2010, 2. Aufl.
- [45] Lange, K. (Hrsg.): Umformtechnik - Handbuch für Industrie und Wissenschaft - Band 3: Blechbearbeitung. Springer, 1990, 2. Aufl.
- [46] Lange, K.; Birzer, F.; Höfel, P.; Mukhoty, A.; Singer, H.: Umformen und Feinschneiden - Handbuch für Verfahren, Werkstoffe, Teilegestaltung. Edelstahlwerke Buderus. Hallwag, 1997

- [47] Bach, E. L.: Die Spannungen unter einem kreisrunden Stempel - Dissertation. Technische Hochschule Karlsruhe, 1923
- [48] Romanowski, W. P.: Handbuch der Stanzereitechnik. VEB Verlag Technik, 1959
- [49] Guidi, A.: Nachschneiden und Feinschneiden. Hanser, 1965
- [50] VDI 2906-2:1994-05: Schnittflächenqualität beim Schneiden, Beschneiden und Lochen von Werkstücken aus Metall - Scherschneiden.
- [51] Hoogen, M.: Einfluß der Werkzeuggeometrie auf das Scherschneiden und Reißen von Aluminiumfeiblechen. In: Hoffmann, H.: Utg-Forschungsberichte, Bd. 6. Hieronymus, 1999
- [52] VDI 2906-1:1994-05: Schnittflächenqualität beim Schneiden, Beschneiden und Lochen von Werkstücken aus Metall - Allgemeines, Kenngrößen, Werkstoffe.
- [53] Paetzold, I.; Dittmann, F.; Feistle, M.; Golle, R.; Haefele, P.; Hoffmann, H.; Volk, W.: Influence of shear cutting parameters on the fatigue behavior of a dual-phase steel. J. Phys.: Conf. Ser. 896(2017), S. 12107
- [54] Timmerbeil, F. W.: Untersuchungen des Schneidvorganges bei Blech, insbesondere beim geschlossenen Schnitt - Dissertation. Technische Hochschule Hannover, 1957
- [55] Hörmann, F.: Einfluss der Prozessparameter auf einstufige Scherschneidverfahren zum Ausschneiden mit endkonturnaher Form. In: Hoffmann, H.: Utg-Forschungsberichte, Bd. 46. Hieronymus, 2008
- [56] Bleck, W.; Moeller, E. (Hrsg.): Handbuch Stahl - Auswahl, Verarbeitung, Anwendung. Hanser, 2017
- [57] Klocke, F.: Fertigungsverfahren 4 - Umformen. Springer, 2017, 6. Aufl.
- [58] Kerschner, M.; Erdmann, C. M.; Hoogen, M.; Gusinde, A.; Golle, R.: Flitterbildung vermeiden beim Zerteilen von Aluminium. BLECH inForm, (2003)4, S. 26-29
- [59] Erdmann, C. M.: Mechanismen der Flitterentstehung beim Scherschneiden von Pressteilen aus Aluminiumblech. In: Hoffmann, H.: Utg-Forschungsberichte, Bd. 31. Hieronymus, 2004, Als Typoskr. gedr

- [60] Krinninger, M.; Steinlehner, F.; Opritescu, D.; Golle, R.; Volk, W.: On the Influence of Different Parameters on the Characteristic Cutting Surface when Shear Cutting Aluminum. *Procedia CIRP* 63(2017), S. 230–235
- [61] Krinninger, M. W.: Ansätze zur Reduzierung der prozessbedingten Flitterbildung beim Scherschneiden von Aluminiumblechen im offenen Schnitt: Schriftenreihe Umformtechnik und Gießereiwesen, Bd. 19. TUM.University Press, 2020, 1. Auflage
- [62] Levy, B. S.; van Tyne, C. J.: Review of the Shearing Process for Sheet Steels and Its Effect on Sheared-Edge Stretching. *J. of Materi Eng and Perform* 21(2012)7, S. 1205–1213
- [63] Tsoupis, I.; Hildering, S.; Merklein, M.: Bending of High-strength Low-alloyed Steel with Respect to Edge Crack Sensitivity Caused by Shearing Operations. *Procedia Engineering* 81(2014), S. 712–717
- [64] Tsoupis, I.; Merklein, M.: Edge crack sensitivity of lightweight materials under different load conditions. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 159(2016), S. 12017
- [65] Zhang, K.; Hamada, S.; Koyama, M.; Yokoi, T.; Noguchi, H.: Influence of shear-affected-zone due to punching on tensile characteristics of steel plate. *Procedia Structural Integrity* 13(2018), S. 1047–1052
- [66] Gläsner, T.; Sunderkötter, C.; Plath, A.; Volk, W.; Hoffmann, H.; Golle, R.: Methods to Decrease Cut Edge Sensitivity of High Strength Steels. *KEM* 611-612(2014), S. 1294–1307
- [67] Gläsner, T.; Sunderkötter, C.; Hoffmann, H.; Volk, W.; Golle, R.: Development of a 2-stage shear-cutting-process to reduce cut-edge-sensitivity of steels. *J. Phys.: Conf. Ser.* 896(2017), S. 12104
- [68] Feistle, M.; Pätzold, I.; Golle, R.; Volk, W.; Frehn, A.; Ilkens, R.: Maximizing the Expansion Ratio through Multi-stage Shear-cutting Process during Collar Forming. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 418(2018), S. 12071
- [69] Golovashchenko, S.; Zhou, W.; Nasheralahkami, S.; Wang, N.: Trimming and Sheared Edge Stretchability of Light Weight Sheet Metal Blanks. *Procedia Engineering* 207(2017), S. 1552–1557
- [70] Nasheralahkami, S.; Zhou, W.; Golovashchenko, S.: Study of Sheared Edge Formability of Ultra-High Strength DP980 Sheet Metal Blanks. *J. Manuf. Sci. Eng.* 141(2019)9, S. 279

- [71] Golovashchenko, S.; Reinberg, N.; Wang, N.; Le, Q.: Effect of material structure on trimming and sheared edge stretchability of 6xxx aluminum alloys. IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 651(2019), S. 12027
- [72] ISO 16630:2009-07: Metallic materials - Sheet and strip - Hole expanding test.
- [73] Feistle, M.; Golle, R.; Volk, W.: Determining the Influence of Shear Cutting Parameters on the Edge Cracking Susceptibility of High-strength-steels Using the Edge-fracture-tensile-test. Procedia CIRP 41(2016), S. 1078–1083
- [74] Feistle, M.; Pätzold, I.; Golle, R.; Volk, W.: Predicting Edge Cracks on Shear-Cut High-Strength Steels by Modified Uniaxial Tensile Tests. KEM 703(2016), S. 49–55
- [75] Feistle, M.; Pätzold, I.; Golle, R.; Volk, W.: Open hole tensile tests for the determination of the edge-crack sensitivity of sheared holes dependent on specimen geometry, cutting parameters, and the notch factor. Procedia Manufacturing 29(2019), S. 412–419
- [76] Weiss, H. A.; Trober, P.; Golle, R.; Steentjes, S.; Leuning, N.; Hameyer, K.; Volk, W.: Loss reduction due to blanking parameter optimization for different non-grain oriented electrical steel grades 2017 IEEE International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC). IEEE, S. 1–7
- [77] Weiss, H. A.; Leuning, N.; Steentjes, S.; Hameyer, K.; Andorfer, T.; Jenner, S.; Volk, W.: Influence of shear cutting parameters on the electromagnetic properties of non-oriented electrical steel sheets. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 421(2017), S. 250–259
- [78] Weiss, H. A.: Fertigung effizienter Elektromotoren - Einfluss des Scherschneidvorgangs auf die magnetischen Eigenschaften von Elektrolech - Dissertation. Technische Universität München, 2019
- [79] Katsuta, E.; Aizawa, T.; Morita, H.; Dohda, K.; Anzai, M.: Fine piercing of electromagnetic steel sheets by micro-punches under nearly zero clearance. Procedia Manufacturing 15(2018), S. 1459–1466
- [80] Laakso, S. V.A.; Väänänen, A.; Bossuyt, S.; Arkkio, A.: Dull punch line is not a joke – Worn cutting edge causes higher iron losses in electrical steel piercing. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing 55(2019), S. 141–146

- [81] Mori, K.-i.: Review of Shearing Processes of High Strength Steel Sheets. JMMP 4(2020)2, S. 54
- [82] Abe, Y.; Yonekawa, R.; Sedoguchi, K.; Mori, K.-i.: Shearing of ultra-high strength steel sheets with step punch. Procedia Manufacturing 15(2018), S. 597–604
- [83] Feistle, M.; Koslow, I.; Krinninger, M.; Golle, R.; Volk, W.: Reduction of Burr Formation for Conventional Shear Cutting of Boron-alloyed Sheets through Focused Heat Treatment. Procedia CIRP 63(2017), S. 493–498
- [84] Neumayer, F. F.; Vogt, S.; Gueffroy, M.; Jesner, G.; Kelsch, R.; Geile, M.; Sommer, A.; Golle, R.; Volk, W.: Warm and cold blanking of manganese-boron steel 22MnB5 with different tool geometries. Procedia Manufacturing 29(2019), S. 345–352
- [85] Maeno, T.; Sugawara, M.; Saito, T.; Terada, A.; Mori, K. I.: Improvement of burnished area in punching of stainless steel thick plate by means of pulsating motion. Procedia Manufacturing 50(2020), S. 203–209
- [86] Katoh, K.; Kondo, K.: Control of rollover of sheared edge in punching of high strength steel sheets. Procedia Manufacturing 15(2018), S. 584–589
- [87] Sachnik, P.: Methodik für gratfreie Schnittflächen beim Scherschneiden. Technische Universität München, 2017
- [88] Demmel, P.; Hoffmann, H.; Golle, R.; Intra, C.; Volk, W.: Interaction of heat generation and material behaviour in sheet metal blanking. Annals of the CIRP 64(2015)1, S. 249–252
- [89] Tröber, P.; Demmel, P.; Hoffmann, H.; Golle, R.; Volk, W.: On the influence of Seebeck coefficients on adhesive tool wear during sheet metal processing. Annals of the CIRP 66(2017)1, S. 293–296
- [90] Abe, Y.; Okamoto, Y.; Mori, K.; Jaafar, H.: Deformation behaviour and reduction in flying speed of scrap in trimming of ultra-high strength steel sheets. J. Mater. Process. Technol. 250(2017), S. 372–378
- [91] Ghiotti, A.; Bruschi, S.; Regazzo, P.: Shear Surface Control in Blanking by Adaptronic Systems. Procedia Engineering 81(2014), S. 2512–2517

- [92] Behrens, B.-A.; Hasselbusch, T.; Weinstein, M.; Twiefel, J.; Wallaschek, J.: Dämpfung der Stößelschwingungen beim Scherschneiden mittels piezoelektrischer Aktoren. *UTFscience*, (2017)1, S. 1–8
- [93] Kaenel, H.-M. von: Wer prägte die ersten Münzen? *Forschung Frankfurt* 30(2012)2, S. 83–86
- [94] Geiger, M.; Kleiner, M.; Eckstein, R.; Tiesler, N.; Engel, U.: Microforming. *Annals of the CIRP* 50(2001)2, S. 445–462
- [95] DIN 8583-4:2003-09: Fertigungsverfahren Druckumformen - Teil 4: Gesenkformen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
- [96] DIN 8583-5:2003-09: Fertigungsverfahren Druckumformen - Teil 5: Eindrücken - Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
- [97] Dietrich, J.; Tschätsch, H.: *Praxis der Umformtechnik - Umform- und Zerteilverfahren, Werkzeuge, Maschinen*. Springer+Vieweg, 2013, 11. Aufl.
- [98] Keran, Z.; Math, M.; Skunca, M.; Barlat, F.; Moon, Y. H.; Lee, M. G.: Coining as a microforming process: *Proc. AIP*, 2010, S. 403–408
- [99] Schubert, A.; Böhm, J.; Burkhardt, T.: Mikroprägen - Herstellen metallischer Mikrostrukturbauteile durch Kaltprägen. *wt-online* 90(2000)11/12, S. 479–483
- [100] DIN 8580:2003-09: Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung.
- [101] DIN 8585-4:2003-09: Fertigungsverfahren Zugumformen - Teil 4: Tiefen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe.
- [102] Fritz, A. H.; Schulze, G.: *Fertigungstechnik*. Springer, 2012, 10. Aufl.
- [103] Bocharov, Y.; Kobayashi, S.; Thomsen, E. G.: The Mechanics of the Coining Process. *Journal of Engineering for Industry* 84(1962)4, S. 491–501
- [104] Kiran, C.; Shaw, M. C.: Coining. *Annals of the CIRP* 32(1983)1, S. 151–154
- [105] Ike, H.; Plancak, M.: Coining process as a means of controlling surface microgeometry. *J. Mater. Process. Technol.* 80–81(1998), S. 101–107
- [106] Ike, H.: Controlling Metal Flow of Surface Microgeometry in Coining Process. In: Geiger, M. (Hrsg.): *Proc. 6th Int. Conf. Technology of Plasticity*. Springer, 1999, S. 907–912

- [107] Ike, H.: Surface deformation vs. bulk plastic deformation—a key for microscopic control of surfaces in metal forming. *J. Mater. Process. Technol.* 138(2003)1-3, S. 250–255
- [108] Buffa, G.; Fratini, L.; Micari, F.: The Relevance Of The Preform Design In Coining Processes Of Cupronickel Alloy. In: Sá, J. M. A. C.; Santos, A. D. (Hrsg.): *Proc.*, 2007, S. 1005–1010
- [109] Kim, G.-Y.; Koç, M.; Ni, J.: Experimental and Numerical Investigations on Microcoining of Stainless Steel 304. *J. Manuf. Sci. Eng.* 130(2008)4, S. 41017
- [110] Rattay, B.: Untersuchung der Einflussgrößen auf die Formfüllung und die Werkzeugbelastungen beim Prägen von Mikrokanalstrukturen in metallische Bleche. In: Bley, H.; Hirt, G.; Weber, C.: *Schriftenreihe Produktionstechnik*, Bd. 27. Universität des Saarlandes, 2003
- [111] Thome, M.; Hirt, G.; Rattay, B.: Metal Flow and Die Filling in Coining of Micro Structures with and without Flash. *Adv. Mater. Res.*, (2005)6-8, S. 631–638
- [112] Merklein, M.; Stellin, T.; Engel, U.: Simulation of a Full Forward Extrusion Process from Metal Strip. *Key Eng. Mater.*, (2011), S. 493–498
- [113] Thome, M.: Umformtechnische Herstellung funktionaler flächiger Mikrostrukturen in metallischen Werkstoffen. In: Hirt, G.; Raabe, D.; Kopp, R.: *Umformtechnische Schriften*, Bd. 150. Shaker, 2009
- [114] Schubert, A.; Jahn, S. F.; Müller, B.: Microstructuring by a Combination of Micro Impact Extrusion and Shear Displacement Forming. *KEM* 554-557(2013), S. 893–899
- [115] Neugebauer, R.; Schubert, A.; Burkhardt, T.: Wirkung höherer Umformgeschwindigkeiten auf Strukturausbildung und Werkzeugbelastung beim Mikroumformen. In: Kopp, R. (Hrsg.): *Erweiterung der Formgebungsgrenzen bei Umformprozessen - Abschlussbericht zum DFG-Schwerpunktprogramm 1074*. Mainz, 2005, S. 277–284
- [116] Uhlmann, E.; König, C.; Ziefle, A.; Prasol, L.: Coining of Micro Structures with an Electromagnetically Driven Tool. In: Tekkaya, A. E.; Daehn, Glenn, S. (Hrsg.): *Proc. 5th International Conference on High Speed Forming (ICHSF 2012)*, 2012, S. 45–52

- [117] Wang, C. J.; Shan, D. B.; Zhou, J.; Guo, B.; Sun, L. N.: Size effects of the cavity dimension on the microforming ability during coining process. *J. Mater. Process. Technol.* 187-188(2007), S. 256–259
- [118] Qiao, X. G.; Gao, N.; Moktadir, Z.; Kraft, M.; Starink, M. J.: Fabrication of MEMS components using ultrafine-grained aluminium alloys. *J. Micromech. Microeng.* 20(2010)4, S. 45029
- [119] Qiao, X. G.; Bah, M. T.; Zhang, J.; Gao, N.; Moktadir, Z.; Kraft, M.; Starink, M. J.: Microembossing of ultrafine grained Al: microstructural analysis and finite element modelling. *J. Micromech. Microeng.* 20(2010)10, S. 105002
- [120] Xu, J.; Shi, L.; Wang, C.; Shan, D.; Guo, B.: Micro hot embossing of micro-array channels in ultrafine-grained pure aluminum using a silicon die. *J. Mater. Process. Technol.* 225(2015), S. 375–384
- [121] Xu, J.; Zhu, X.; Shi, L.; Shan, D.; Guo, B.; Langdon, T. G.: Micro-Forming Using Ultrafine-Grained Aluminum Processed by Equal-Channel Angular Pressing. *Adv. Eng. Mater.* 17(2015)7, S. 1022–1033
- [122] Su, Q.; Xu, J.; Shi, L.; Shan, D. B.; Guo, B.: Micro-Embossing Process in Ultrafine-Grained Pure Aluminum Processed by Equal-Channel Angular Pressing with Elevated Temperature. *KEM* 821(2019), S. 244–249
- [123] Su, Q.; Xu, J.; Yu, H.; Shi, L.; Shan, D.; Guo, B.: Effect of Grain Size on Formability and Deformation Mechanism of High-Purity Aluminum during Micro-Embossing Process at Elevated Temperature. *Adv. Eng. Mater.* 21(2019)10, S. 1900690
- [124] Li, X.; Liu, J.; Xu, J.; Wang, Z.; Chen, J.: Mass copper micro-embossing by tungsten die for MEMS applications. *J. Micromech. Microeng.* 28(2018)11, S. 115016
- [125] Xu, J.; Su, Q.; Shan, D.; Guo, B.: Sustainable micro-manufacturing of superhydrophobic surface on ultrafine-grained pure aluminum substrate combining micro-embossing and surface modification. *Journal of Cleaner Production* 232(2019), S. 705–712
- [126] Achouri, M.; Gildemyn, E.; Germain, G.; Dal Santo, P.; Potiron, A.: Influence of the edge rounding process on the behaviour of blanked parts: numerical predictions with experimental correlation. *Int J Adv Manuf Technol* 71(2014)5-8, S. 1019–1032

- [127] Becker, N.; Pöhlandt, K.; Lange, K.: Improvement of the Plane-Strain Compression Test for Determining Flow Curves. CIRP Annals 38(1989)1, S. 227–230
- [128] Nádai, A.: Plasticity - A mechanics of the plastic state of matter. MacGraw-Hill, 1931
- [129] Orowan, E.: The Calculation of Roll Pressure in Hot and Cold Flat Rolling. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 150(1943)1, S. 140–167
- [130] Lange, K. (Hrsg.): Umformtechnik - Handbuch für Industrie und Wissenschaft - Band 1: Grundlagen. Springer, 2002, 2. Aufl.
- [131] Watts, A. B.; Ford, H.: On the Basic Yield Stress Curve for a Metal. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers 169(1955)1, S. 1141–1156
- [132] Lacey, A. J., et al.: Measuring Flow Stress in Hot Plane Strain Compression Tests. In: National Physical Laboratory (Hrsg.): Good Practice Guide, Middlesex, 2002
- [133] Becker, N.: Weiterentwicklung von Verfahren zur Aufnahme von Fließkurven im Bereich hoher Umformgrade. In: Lange, K.: Berichte aus dem Institut für Umformtechnik der Universität Stuttgart, Bd. 122. Springer, 1994
- [134] Lange, K. (Hrsg.): Lehrbuch der Umformtechnik. Springer, 1974
- [135] van Putten, K.; Kopp, R.; Hirt, G.: Size effects in the production of micro strip by the flat rolling of wire. In: Menz, W.; Dimov, S. S.; Fillon, B. (Hrsg.): Proc. 2nd Int. Conf. Multi-Material Micro Manufacturing. Elsevier, 2006, S. 277–280
- [136] van Putten, K.: Größeneffekte beim Walzen von Mikrobändern aus Kupferdraht. Metall - Fachzeitschrift für Metallurgie 64(2010)3, S. 97–99
- [137] van Putten, K.; Roters, F.; Kirch, D.; Hirt, G.: Experimental and numerical investigations of the plane strain compression of an oligocrystalline pure copper specimen. J. Mater. Process. Technol. 211(2011)8, S. 1305–1323
- [138] Rietman, B.: Numerical analysis of inhomogeneous deformation in plane strain compression. Universiteit Twente. Ponsen & Looijen, 1999

- [139] N.N.: BSTA 510 - Produktbroschüre. Bruderer AG (Hrsg.), Frasnacht, 2013
- [140] Ivers-Tiffée, E.; Münch, W. v.: Werkstoffe der Elektrotechnik. Teubner, 2007, 10. Aufl.
- [141] Ilchner, B.; Singer, R. F.: Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik. Springer, 2010
- [142] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium. Springer, 2007, 2. Aufl.
- [143] DIN EN 573-3:2019-10: Aluminium und Aluminiumlegierungen - Chemische Zusammensetzung und Form von Halbzeug - Teil 3: Chemische Zusammensetzung und Erzeugnisformen.
- [144] DIN EN 485-4:2019-05: Aluminium und Aluminiumlegierungen - Bänder, Bleche und Platten - Teil 4: Grenzabmaße und Formtoleranzen für kaltgewalzte Erzeugnisse.
- [145] DIN EN 485-2:2018-12: Aluminium und Aluminiumlegierungen - Bänder, Bleche und Platten - Teil 2: Mechanische Eigenschaften.
- [146] Bargel, H.-J.; Schulze, G.: Werkstoffkunde. Springer, 2008
- [147] N.N.: Bronze - unverzichtbarer Werkstoff der Moderne. Deutsches Kupferinstitut (Hrsg.), 2004, URL: https://www.kupferinstitut.de/fileadmin/user_upload/kupferinstitut.de/de/Documents/Shop/Verlag/Downloads/Werkstoffe/brosch20.pdf; [06.10.2014]
- [148] DIN EN 1654:2019-05: Kupfer und Kupferlegierungen - Bänder für Federn und Steckverbinder.
- [149] N.N.: DKI Werkstoff-Datenblätter CuSn6. Deutsches Kupferinstitut (Hrsg.), 2006
- [150] DIN 50106:2016-11: Prüfung metallischer Werkstoffe - Druckversuch bei Raumtemperatur.
- [151] Fink: Untersuchung des Scherschneidverhaltens von CuSn6 und AlMg3 zur Herstellung beständig mediendichter elektronischer Komponenten - Bachelorarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2014
- [152] 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

- [153] Quetting, F.; Hora, P.; Roll, K.: Modelling of Strain Hardening Behaviour of Sheet Metals for Stochastic Simulations. KEM 504-506(2012), S. 41–46
- [154] DIN EN ISO 643:2013-05: Stahl - Mikrophotographische Bestimmung der erkennbaren Korngröße.
- [155] Dietrich, E.; Conrad, S.: Eignungsnachweis von Messsystemen. Hanser, 2015, 4. Aufl.
- [156] Polzmacher, C.: Simulative Untersuchung umformtechnischer Strukturierungsmethoden für biegesteife Kunststoff-Metall-Hybridbauteile im Kontext der Prozesskette - Masterarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017
- [157] DIN EN ISO 14577-1:2015-11: Metallische Werkstoffe - Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter - Teil 1: Prüfverfahren.
- [158] DIN EN ISO 6507-1:2018-07: Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers - Teil 1: Prüfverfahren.
- [159] Vajna, S.: CAx für Ingenieure - Eine praxisbezogene Einführung. Springer, 2009, 2. Aufl.
- [160] Wagoner, R. H.; Chenot, J. L.: Metal forming analysis. Cambridge University Press, 2001
- [161] Schafstall, H. A. H.: Verbesserung der Simulationsgenauigkeit ausgewählter Massivumformverfahren durch eine adaptive Reibwertvorgabe. In: Berichte aus der Fertigungstechnik - Universität der Bundeswehr Hamburg. Shaker, 1999
- [162] Gunnesch, M.: Qualifizierung und Inbetriebnahme eines Folgeverbundwerkzeugs - Bachelorarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2016
- [163] Böhler Edelstahl GmbH & Co KG: High Speed Steel - Datasheet. Böhler Edelstahl GmbH & Co KG (Hrsg.), 2009
- [164] Altenbach, H. (Hrsg.): Holzmann/Meyer/Schumpich Technische Mechanik Festigkeitslehre. Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014
- [165] N.N.: Katalog - Stanzgestelle. Meusburger Georg GmbH & Co KG (Hrsg.), 2019, URL: <https://catalogue.meusburger.com/ausgaben/84Stanzgestelle/#>; [11.09.2020]

- [166] Steinlein, F.: Entwicklung eines mehrstufigen Prägeprozesses im Kontext eines Folgeverbundwerkzeuges zur Strukturierung metallischer Einleger für Kunststoff-Metall- Hybridbauteile - Masterarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2017
- [167] Frey, P.; Heinle, M.; Leisen, C.; Drummer, D.; Merklein, M.: Embossing of Metal Inserts for Subsequent Assembly Injection Moulding of Media Tight Electronic Systems. KEM 639(2015), S. 99-106
- [168] Lippmann, H.; Mahrenholtz, O.: Plastomechanik der Umformung metallischer Werkstoffe. Springer, 1967
- [169] Hop, R. M.: Entwicklung von Prüfverfahren zur Bestimmung von Umformbarkeit und Fließspannung von Werkstoffen auf der Basis intermetallischer Verbindungen - Dissertation. Technische Universität Eindhoven, 1991
- [170] Höhler, C.: Untersuchung von Eigenspannungen in schergeschnittenen und umgeformten metallischen Einlegern im Kontext thermischer Belastung - Masterarbeit. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2015
- [171] Engel, U.; Eckstein, R.: Microforming—from basic research to its realization. J. Mater. Process. Technol. 125-126(2002), S. 35-44
- [172] Meßner, A.: Kaltmassivumformung metallischer Kleinstteile - Werkstoffverhalten, Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung. In: Geiger, M.; Feldmann, K.: Fertigungstechnik - Erlangen, Bd. 75. Meisenbach, 1998
- [173] Vollertsen, F.: Micro metal forming. Springer, 2013
- [174] van Putten, K.: Size effects on the rolling of small and thin microstrip determined by wire flat rolling and plane strain compression experiments. In: Hirt, G.; Raabe, D.; Kopp, R.: Umformtechnische Schriften, Bd. 141. Shaker, 2008
- [175] Pfestorf, M.: Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen in der Umformtechnik. In: Geiger, M.; Feldmann, K.: Fertigungstechnik - Erlangen, Bd. 72. Meisenbach, 1997
- [176] Müller, J.: Leitfaden zur industriellen Dichtheitsprüfung. Dr. Wiesner Steuerungstechnik GmbH (Hrsg.), 2011

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Frey, P.; Heinle, M.; Leisen, C.; Drummer, D.; Merklein, M.: Embossing of Metal Inserts for Subsequent Assembly Injection Moulding of Media Tight Electronic Systems. KEM 639(2015), S. 99–106
- [P2] Frey, P.; Heinle, M.; Drummer, D.; Merklein, M.: Influence of Metal Inserts with Microformed Edges on Subsequent Injection Assembly Moulding for Media Tight Electronic Systems. In: Qin, Y.; Dean, T. A.; Lin, J.; Yuan, S. J.; Vollertsen, F. (Hrsg.): Proc. 4th International Conference on New Forming Technology (ICNFT 2015), 2015
- [P3] Frey, P.; Höhler, C.; Merklein, M.: Effect of Residual Stress on the Distortion of Microembossed Metal Inserts for Assembly Injection Moulding. In: Tosello, G.; Hansen, H. N.; Ehmann, K.; Dimov, S. (Hrsg.) 4M/IWMF2016 The Global Conference on Micro Manufacture : Incorporating the 11th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture (4M) and the 10th International Workshop on Microfactories (IWMF). Research Publishing Services, 2016, S. 213–216
- [P4] Heinle, M.; Frey, P.; Merklein, M.; Drummer, D.: Einfluss mikrogeformter Kanten an Metalleinlegern auf die Temperaturwechselbeständigkeit mediendichter Kunststoff-Metall-Hybriden. J. Plast. Technol. 14(2018)3, S. 211–232
- [P5] Kleffel, T.; Frey, P.; Merklein, M.; Drummer, D.: Analysis of the formation of gap-based leakages in polymer-metal electronic systems with labyrinth seals. Journal of Polymer Engineering 39(2019)6, S. 573–586

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten

- [S1] Fink, F.: Untersuchung des Scherschneidverhaltens von CuSn6 und AlMg₃ zur Herstellung beständig mediendichter elektronischer Komponenten. Bachelorarbeit. Erlangen, 2014
- [S2] Frey, P.: Auslegung eines Mikroprägeprozesses für metallische Einleger und Untersuchung des Werkstoffflusses. Masterarbeit. Erlangen, 2014
- [S3] Höhler, C.: Untersuchung von Eigenspannungen in schergeschnittenen und umgeformten metallischen Einlegern im Kontext thermischer Belastung. Masterarbeit. Erlangen, 2015
- [S4] Gänßbauer, F.: Auslegung eines Prägeprozesses zum Kantenverrunden metallischer Einleger und Untersuchung primärer Einflussgrößen. Projektarbeit. Erlangen, 2015
- [S5] Gunnesch, M.: Inbetriebnahme und Qualifizierung eines Folgeschneidwerkzeuges. Bachelorarbeit. Erlangen, 2016
- [S6] Ott, J.: Simulative Analyse der werkzeugseitigen Stoffflusssteuerung eines Prägeprozesses für metallische Einleger zur Herstellung von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen. Bachelorarbeit. Erlangen, 2017
- [S7] Polzmacher, C.: Simulative Untersuchung umformtechnischer Strukturierungsmethoden für biegesteife Kunststoff Metall Hybridbauteile im Kontext der Prozesskette. Masterarbeit. Erlangen, 2017
- [S8] Schießl, S.: Simulative Analyse eines Prägeprozesses zur Strukturierung metallischer Einleger für die Herstellung von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen. Projektarbeit. Erlangen, 2017
- [S9] Steindl, M.: Herstellung und Qualifizierung hierarchisch strukturierter Prägewerkzeuge mittels Mikroerodierttechnik. Bachelorarbeit. Erlangen, 2017
- [S10] Steinlein, F.: Entwicklung eines mehrstufigen Prägeprozesses im Kontext eines Folgeverbundwerkzeuges zur Strukturierung metallischer Einleger für Kunststoff-Metall-Hybridbauteile. Masterarbeit. Erlangen, 2017
- [S11] Feuerer, C.: Entwicklung einer mehrstufigen Prozesskettensimulation eines Folgeverbundprozesses zur Strukturierung metallischer Einleger für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile. Masterarbeit. Erlangen, 2018

- [S₁₂] Hetzner, M.: Analyse des Verformungsverhaltens geprägter metallischer Einleger für Kunststoff-Metall-Hybridbauteile unter Zug- und Biegebeanspruchung. Bachelorarbeit. Erlangen, 2018
- [S₁₃] Kieckhöfel, M.: Vergleich und Bewertung unterschiedlicher Messmethoden der Schnittkantenqualität schergeschnittener Blechbauteile. Bachelorarbeit. Erlangen, 2018
- [S₁₄] Probst, C.: Charakterisierung der Makro- und Mikrogeometrie geprägter, metallischer Einleger für Kunststoff-Metall-Hybridbauteile. Bachelorarbeit. Erlangen, 2018

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2022):

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
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
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
Projektierung 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 Bruchverhal-
tens 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 Schraub-
technik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur
Flexibilitätssteigerung der
rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montage-
feinplanung
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 Biegeumforme mit
elastischer Matrize
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-Laserstrahlbear-
beitung 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 Kommuni-
kationsverhaltens von Automatisierungs-
geräten 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 Simula-
tionsverfahrens 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 Ehmann
Operatives Fertigungscontrolling durch
Optimierung auftragsbezogener Bearbei-
tungsabläufe 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-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmen-
der 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
Zweistrahlschweißtechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration
für flexible Fertigungszellen mit
kooperierenden 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 Fokusparameter 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
Spulenwickeln
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-Laseranlagen
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 umformtech-
nischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert
Regelung der Fokusslage 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
Oberflächenbildung und tribologische
Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbei-
teter 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
Lebensdauervorhersage für Werkzeuge
der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl
Integriertes Simulationsdaten-Manage-
ment 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 Integra-
tion 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 Montage-
systemen 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-Punkt-
schweißen 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 Lötten 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 Negendanck
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-Ent-
wicklung 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 Tribologie, 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 Laserdurchstrahlsschweißen
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 bleifreie
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 Al-
loys 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 Kaltmassiv-
umformwerkzeugen
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 spritz-
gegossener Schaltungsträger
(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 wirk-
medienbasierter 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 Aluminiumplatten
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
Laserstrahlschweißen 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 wirkmedienba-
sierte 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 Werkzeugle-
bensdaueroptimierung und Präzisionsfer-
tigung 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 makrome-
chatronischen Modulen zur flexiblen
Integration in hybride
Pkw-Bordnetzsysteme
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 Herstellungsver-
fahren und erweiterte Qualitätssicherung
von einsatzgerechten elektronischen Bau-
gruppen
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 Rührreibschweißen 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 Innenhoch-
druck-Umformung von flächigen Halb-
zeugen 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 Zuverlässigkeitsuntersu-
chungen, Prüfabläufen und Nacharbeits-
prozessen in der Elektronikproduktion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich
Sensoriken zur Schwerpunktslagebestim-
mung der optischen Prozessemissionen
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
Laserdurchstrahlsschweißen
transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreibschweißen 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 Crashtaughigkeit 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 Laserdurchstrahl-
schweißen 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 Größeneffek-
ten 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
Betauung 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 Prozess-
grenzen bei der Innhochdruck-Umfor-
mung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke
Mehrkriterielle 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 Optimie-
rung 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 Laserstrahlsintern 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 Lichtwellenlei-
tern
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 Versa-
gens von Punktschweißverbindungen bei
höchstfesten Stahlgüten
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser
Ein Ansatz zur Herstellung von
pressgehärteten Karosseriekomponenten
mit maßgeschneiderten mechanischen
Eigenschaften: Temperierte Umformwerk-
zeuge. 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 Stahlblechwerk-
stoffen - 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
Brücksichtigung 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 Entwick-
lung 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 Laserstrahllöten
und -reparaturlöten 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
widerstandspunktgeschweißter
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 Elektrofahr-
zeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösler
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 Karosseriebau-
teile 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 Prozess
simulation von Biegeumform- und Falz-
verfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl
Flexible Automatisierung der
Statorenmontage 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 Mischverbin-
dungen 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 Validie-
rung 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
Laserstrahltiefschweißprozesses durch
Detektion der Metaldampffackelposition
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 An-
lagenengineerings
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 aushärtbarer
Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert
Erweiterung und Verbesserung von Ver-
suchs- und Auswertetechniken für die Be-
stimmung von Grenzformänderungskur-
ven
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 Alumi-
niumlegierungen unter Anwendung einer
zwischen geschalteten 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 Presshärtprozess 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 Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrol-
lings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung zyklisch-symmetrischer
Bauteile mit Nebenformelementen durch
Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der
tribologischen Bedingungen in der
Blechmassivumformung - Bereitstellung
von tribologischen Modellversuchen 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 Absicherung
der formgebenden Operation des
Nasspressprozesses von
Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-414-3.

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

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

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung 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 Systeme zur
Montage von Permanentmagneten und
zur Messung magnetischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten
hochfester Leichtbauwerkstoffe 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 Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der
Lasermikromaterialbearbeitung –
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 Energy-Efficient
Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-424-2.

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

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung
montageführender Werkerinformations-
systeme 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 simultanem,
intensitätsselektivem
Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unterstütz-
ten Fertigungskette zur Herstellung
umgeformter Bauteile aus der härtesten
Aluminiumlegierung 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, Modeling,
Simulation and Optimization of Molded
Interconnect Devices (MID) Based on
Laser Direct Structuring (LDS) / Experi-
mentelle Untersuchung, Modellierung, Si-
mulation und Optimierung von Molded
Interconnect Devices (MID) basierend auf
Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsverfahren
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 Werk-
stoffverhaltens der Magnesium-
legierung 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 Blechmassivumformpro-
zessen 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 artun-
gleicher Werkstoffe mittels
Schneidclinchverfahren
LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbond-
technologie für integrierte Leistungs-
module in harschen Umgebungs-
bedingungen
FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc
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 Stahlble-
che
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 Unter-
suchung 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 Blechmas-
sivumformung
LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand
Entwicklung einer Methodik zur Herstel-
lung 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 Karosserierohbau:
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 Ein-
fluss fertigungsbedingter Eigenschaften
auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassiv-
umgeformter 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 Tiefzieh-
prozesse durch maßgeschneiderte Werk-
zeugoberflächen
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-strukturen
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 transienter 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 laserdirekt-
strukturierter 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 Prozess-
überwachung auf Basis sozio-cyber-physi-
scher 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 Herstel-
lung 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 schräg-
verzahnten 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 Heißcrimpprozesses

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 Aluminiumblech-
bauteile 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 Auftei-
lung von Prozessbewegungen in syn-
chrone Werkstück- und Werkzeugbewe-
gungen 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 Bau-
elemente

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 Geometriemodelle
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 Elec-
tronics 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 Merkl
Closed-Loop Control of a Storage-Sup-
ported 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 Entwick-
lung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshär-
teprozess
LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

Band 364: Eike Wolfram Schäffer
Web- und wissensbasierter Engineering-
Konfigurator für roboterzentrierte Auto-
matisierungslösungen
FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

Band 365: Daniel Gross
Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidba-
sierten kryogenen Minimalmengen-
schmierung
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 Werk-
zeugbau 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 Rei-
bungs-, Axialschub- und Temperaturver-
haltens von Nadelkränzen –
KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder,
39 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-420-2.

Band 369: Daniel Gräf
Funktionalisierung technischer Oberflä-
chen mittels prozessüberwachter aerosol-
basierter 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 Nanokoordina-
tenmesstechnik
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 Oberflächen-
mikrostrukturen für geschmierte tribologi-
sche 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 im-
aging: 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 Integrati-
onsdichte für dreidimensionale mecha-
tronische 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 Pro-
duktspezifikationen
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 Unterstüt-
zung der Produktentwicklung zur Daten-
analyse 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 Ab-
sicherungsmethoden für abweichungs-be-
haftete 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 – Prozesscharakterisie-
rung und Erweiterung eines Überwa-
chungssystems
LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-491-2.

Band 383: Mario Meinhardt
Widerstandselementschweißen mit ge-
stauchten Hilfsfügeelementen - Umform-
technische 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 Fo-
kus 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 Kon-
struktionssystems 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 require-
ments
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 Her-
stellung 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 Rasterkraft-
mikroskop
FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab.
2022. ISBN: 978-3-96147-513-1.

Band 391: Thomas Papke
Untersuchungen zur Umformbarkeit hyb-
rider 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

Abstract

A major challenge in the production of polymer-metal hybrid parts using assembly injection molding is the limited media tightness due to the chemical incompatibility of the two materials. However, the use of metal inserts with defined surface structure has great potential to increase the tightness. Therefore, in this work the structuring of metal inserts by forming in a progressive die is investigated as a highly efficient manufacturing process. The aim of this work is to create an understanding of the manufacturability of structured inserts and to identify the process limits in regard to a functional design. Based on the investigations of rounding the cutting edges by embossing, the cross section of the metal insert was identified as the most important influencing variable on the die filling and thus on the forming accuracy. Within the investigations of the embossing of transverse grooves on the surface of the insert, a holistic understanding is created with regard to the resulting groove geometry and the axial and lateral elongation of the inserts. This is based on the examination of the material flow into axial and lateral directions. In this context, the resulting width in particular is strongly influenced by the prevailing flow restrictions. Finally, the results of the investigation of the structuring of metal inserts by forming are evaluated on the basis of the tightness of overmolded inserts and an increase in the sealing effect is shown. This contributes to the development and manufacturing of resilient electronic systems.

Eine wesentliche Herausforderung bei der Herstellung von Kunststoff-Metall-Hybridbauteilen im Montagespritzguss ist die eingeschränkte Mediendichtheit aufgrund der chemischen Inkompatibilität der beiden Werkstoffe. Der Einsatz strukturierter, metallischer Einleger hat in diesem Zusammenhang ein großes Potential die Dichtheit zu steigern. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher die umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbundwerkzeug als hoch effizientes Fertigungsverfahren untersucht. Ziel dieser Arbeit ist ein Verständnis für die Herstellbarkeit strukturierter Einleger aufzubauen und die Prozessgrenzen abzuleiten im Hinblick auf die funktionsgerechte Auslegung. Anhand der Untersuchungen zum Verrunden der Schnittkanten mittels Prägen wurde die Querschnittsfläche des Einlegers als wichtigste Einflussgröße auf die Formfüllung und somit auf die Abbildungsgenauigkeit identifiziert. Bei den Untersuchungen zum Einprägen von Quernuten in die Einlegeroberfläche konnte durch die Gliederung des Werkstoffflusses in axiale und laterale Richtung, ein ganzheitliches Verständnis hinsichtlich der Ausformung der Nuten sowie der Längung und Breitung der Einleger geschaffen werden. Gerade die Breitung wird in diesem Zusammenhang durch die vorherrschenden Fließbehinderungen stark beeinflusst. Abschließend wurden die Untersuchungsergebnisse der umformtechnischen Strukturierung anhand der resultierenden Dichtheit umspritzter Einleger eingeordnet und eine Erhöhung der Dichtwirkung aufgezeigt. Dadurch wird ein Beitrag zur Entwicklung und Fertigung widerstandsfähiger elektronischer Systeme geleistet.

