



FAU Studien aus dem Maschinenbau 438

**Andreas Rohrmoser**

Erarbeitung eines grundlegenden  
Verständnisses zum Fließpressen  
betriebsangepasster Verzahnungen  
für den Einsatz in der Materialpaarung  
Metall-Kunststoff



Andreas Rohrmoser

Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses zum Fließpressen  
betriebsangepasster Verzahnungen für den Einsatz in der  
Materialpaarung Metall-Kunststoff

# **FAU Studien aus dem Maschinenbau**

## **Band 438**

Herausgeber/-innen:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack


Andreas Rohrmoser

**Erarbeitung eines grundlegenden  
Verständnisses zum Fließpressen  
betriebsangepasster Verzahnungen  
für den Einsatz in der Materialpaarung  
Metall-Kunststoff**

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

Erlangen  
FAU University Press  
2024

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

Kontakt: Andreas Rohrmoser, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-  
Nürnberg ( <https://ror.org/oof7hpc57>)

Bitte zitieren als

Rohrmoser, Andreas. 2024. *Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses  
zum Fließpressen betriebsangepasster Verzahnungen für den Einsatz in der  
Materialpaarung Metall-Kunststoff*. FAU Studien aus dem Maschinenbau  
Band 438. Erlangen: FAU University Press.  
DOI: 10.25593/978-3-96147-724-1.

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

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

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

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-723-4 (Druckausgabe)  
eISBN: 978-3-96147-724-1 (Online-Ausgabe)  
ISSN: 2625-9974  
DOI: 10.25593/978-3-96147-724-1

**Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses  
zum Fließpressen betriebsangepasster  
Verzahnungen für den Einsatz in der  
Materialpaarung Metall-Kunststoff**

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

zur  
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Andreas Rohrmoser, M.Sc.

aus Marburg

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

Tag der mündlichen  
Prüfung: 01.12.2023

Gutachter/in: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein  
Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche,  
TU Darmstadt

## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Wesentliche Erkenntnisse der Arbeit wurden im Rahmen der von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Forschungsgruppe „FOR 2271: Prozessorientiertes Toleranzmanagement mit virtuellen Absicherungsmethoden in dem Teilprojekt „Berücksichtigung funktionsrelevanter Gestaltabweichungen bei der Auslegung von Umformprozessen zur Herstellung von Stirnrädern mit Sonderverzahnung durch Fließpressen“ erarbeitet.

Mein besonderer Dank gilt der Ordinaria des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie, Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein, für die intensive wissenschaftliche Betreuung meiner Forschung und das entgegengebrachte Vertrauen. Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche danke ich für die Übernahme des zweiten Fachgutachtens. Für ihr Mitwirken an meinem Promotionsverfahren als Prüfungsvorsitzender sowie fachfremder Prüfer möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Inf. Hinnerk Hagenah sowie PD Dr.-Ing. Heinz Werner Höppel bedanken.

Zudem danke ich allen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie für die angenehme und stets kollegiale Zusammenarbeit. Mein Dank gilt auch den Mitarbeitenden aus der Buchhaltung, dem Sekretariat, der Systemadministration, dem technischen Bereich sowie den Studierenden für ihre Unterstützung.

Für die fachliche Diskussion der Arbeit sowie die wertvolle Unterstützung danke ich Manuel Reck, Martin Killmann, Miriam Leicht, Thomas Wild, Raphaela März, Andreas Jobst, Alina, Biallas, Christoph Kiener und Max Layer.

Abschließend gilt mein besonderer Dank meinen Eltern, meiner Verlobten Teresa, meiner Patentante Elisabeth sowie meinen Freunden, die mich stets unterstützen und somit zum erfolgreichen Anfertigen meiner Dissertation beigetragen haben.

Regensburg, im Dezember 2023

Andreas Rohrmoser



# Inhaltsverzeichnis

	<b>Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>viii</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Technik und Forschung .....</b>	<b>3</b>
2.1	Trockenlaufende Zahnradgetriebe der Materialpaarung Metall-Kunststoff.....	3
2.1.1	Verschleißverhalten .....	7
2.1.2	Materialkombinationen .....	9
2.1.3	Einflüsse auf den Verschleiß .....	12
2.1.4	Verzahnungsherstellung .....	14
2.2	Fließpressen metallischer Zahnräder .....	15
2.2.1	Verfahrensarten .....	15
2.2.2	Werkstoffe .....	17
2.2.3	Potentiale und Herausforderungen .....	18
2.2.4	Einflüsse auf die umforminduzierten Bauteileigenschaften .....	21
2.3	Zusammenfassende Bewertung und resultierende Forschungslücke.....	24
2.3.1	Unbekannte Einflussgrößen auf den Verschleiß .....	25
2.3.2	Fehlendes Prozessverständnis des Fließpressprozesses ..	26
<b>3</b>	<b>Zielsetzung und Vorgehensweise .....</b>	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>Zahnradpaarung, Herstellung, Werkstoffe und Untersuchungsmethoden .....</b>	<b>31</b>
4.1	Zahngeometrie und Lastfall .....	31
4.2	Verzahnungsherstellung .....	32
4.2.1	Spritzgießen der Kunststoffräder .....	32
4.2.2	Drahterodieren der Metallritzel.....	32
4.2.3	Fließpressen der Metallritzel .....	33
4.3	Werkstoffe .....	36
4.3.1	Metallritzel.....	37
4.3.2	Kunststoffräder .....	41
4.3.3	Umformwerkzeuge.....	42

4.4	Verschleißprüfung.....	43
4.4.1	Getriebeprüfung .....	43
4.4.2	Stift-Scheibe-Prüfung.....	45
4.5	Charakterisierung der Bauteileigenschaften.....	45
4.5.1	Topografie.....	45
4.5.2	Geometrische Eigenschaften.....	46
4.5.3	Mechanische Eigenschaften.....	47
<b>5</b>	<b>Qualifizierung der Methoden .....</b>	<b>49</b>
5.1	Validierung des numerischen Prozessmodells.....	49
5.1.1	Analyse und Abgleich der Bauteileigenschaften.....	49
5.1.2	Analyse und Abgleich der Prozesseigenschaften .....	54
5.2	Prüfung der Vorgehensweise zur Auswertung des Verschleißverhaltens.....	55
5.2.1	Analyse der verschleißbedingten Zahngeometrie.....	56
5.2.2	Identifikation der Verschleißarten .....	58
5.2.3	Anwendung der Auswertemethode .....	59
5.2.4	Übertragbarkeit auf fließgepresste Oberflächen.....	61
5.3	Bewertung der Methoden .....	63
<b>6</b>	<b>Ermittlung von Einflussgrößen auf das Verschleißverhalten ..</b>	<b>65</b>
6.1	Einfluss des metallischen Werkstoffs und des Werkstoffzustands auf das Verschleißverhalten .....	65
6.1.1	Stahl .....	65
6.1.2	Aluminium.....	68
6.1.3	Messing.....	71
6.1.4	Kaltverfestigung im Referenzprozess .....	72
6.2	Einfluss der Zahngeometrie auf das Verschleißverhalten.....	76
6.2.1	Lokale Beanspruchung und lokaler Verschleiß der Zahnflanke der Referenzgeometrie .....	76
6.2.2	Zahnradradien .....	79
6.3	Zusammenfassung der identifizierten Verschleiß- mechanismen .....	83
<b>7</b>	<b>Erarbeitung von Methoden zur betriebsangepassten Herstellung metallischer Verzahnungen .....</b>	<b>89</b>
7.1	Herausforderungen bei der Herstellung einsatzfertiger Verzahnungen .....	89

7.1.1	Einflüsse auf die Verzahnungsgenauigkeit.....	90
7.1.2	Bedarf zur Erweiterung des Prozessverständnisses .....	92
7.2	Ermittlung des Einflusses halbzeugseitiger Größen .....	93
7.2.1	Fließeigenschaften.....	93
7.2.2	Geometrische Abweichungen des Halbzeugs .....	100
7.3	Untersuchung werkzeugseitiger Maßnahmen.....	104
7.4	Bewertung der numerischen Ergebnisse .....	109
<b>8</b>	<b>Verifizierung und wissenschaftliche Bewertung der Erkenntnisse.....</b>	<b>111</b>
8.1	Gezielte Beeinflussung der Bauteileigenschaften .....	111
8.1.1	Geometrische Abweichung des Rohlingdurchmessers... ..	112
8.1.2	Flankenwinkel der Fließpressmatrize.....	115
8.2	Verifizierung des veränderten Verschleißverhaltens.....	119
8.2.1	Erhöhte Zahnflankenhärte .....	119
8.2.2	Umforminduzierte Oberflächentopografie .....	127
8.2.3	Zahnradradien .....	130
8.3	Ableitung eines Verständnisses und Bereitstellung von Empfehlungen für das Fließpressen einsatzfertiger Verzahnungen .....	132
8.3.1	Einflussgrößen auf das Verschleißverhalten .....	132
8.3.2	Gezielte Beeinflussung der Bauteileigenschaften .....	138
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>143</b>
<b>10</b>	<b>Summary and Outlook.....</b>	<b>145</b>
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>147</b>

## Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$b$	mm	Zahnradbreite
$d$	mm	Teilkreisdurchmesser
$d_a$	mm	Kopfkreisdurchmesser
$d_f$	mm	Fußkreisdurchmesser
$i$	-	Übersetzungsverhältnis
$k_f(\phi)$	N/mm <sup>2</sup>	Aktuelle Fließspannung
$k_{f,o}$	N/mm <sup>2</sup>	Anfangsfließspannung
$k_{f,s}$	N/mm <sup>2</sup>	Sättigungsfließspannung
$m$	mm	Modul
$n$	-	Verfestigungsexponent
$n_{\text{Paarungen}}$	-	Anzahl an Zahnradpaarungen
$n_{\text{Proben}}$	-	Anzahl an Proben
$n_{\text{Zähne}}$	-	Anzahl an Zähnen
$n_{\text{Zahnräder}}$	-	Anzahl an Zahnrädern
$r_{\text{Fuß}}$	mm	Fußradius der Verzahnung
$r_{\text{Kopf}}$	mm	Kopfradius der Verzahnung
$s$	-	spezifische Gleiten
$v_{\text{axial}}$	mm/min	Axiale Materialflussgeschwindigkeit
$v_g$	mm/s	Gleitgeschwindigkeit
$v_{\text{Stempel}}$	mm/min	Stempelgeschwindigkeit
$v_t$	mm/s	Umfangsgeschwindigkeit
$w$	mm/s	Tangentialgeschwindigkeit
$z$	-	Zähnezahl
$B_K$	N/mm	Kombinierte Beanspruchung
$E_o$	kV	Beschleunigungsspannung
$E_G$	V	Detektorgitterpotential
$F_T$	N/mm	Linienlast entlang der Zahnflanke
$I_P$	nA	Sondenstrom
$P$	W	Leistung
$T$	Nm	Drehmoment
$\lambda_c$	mm	Grenzwellenlänge
$\lambda_s$	$\mu\text{m}$	kurzwelliger Profilfilter
$\phi$	-	Umformgrad

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
3D	-	Dreidimensional
Al	-	Aluminium
C	-	Kohlenstoff
CO <sub>2</sub>	-	Kohlenstoffdioxid
Cr	-	Chrom
CrCN	-	Chromcarbonitrid
Cu	-	Kupfer
DIN	-	Deutsches Institut für Normung
EDM	-	Electrical Discharge Machining
EDX	-	Energy Dispersive X-ray Spectroscopy
Fe	-	Eisen
FE	-	Finite Elemente
H	-	Wasserstoff
HV	-	Härte nach Vickers
ISO	-	Internationale Organisation für Normung
IT	-	ISO-Toleranzklasse
kfz	-	kubisch flächenzentriert
KMG	-	Koordinatenmessgerät
Mg	-	Magnesium
Mn	-	Mangan
Mo	-	Molybdän
N	-	Stickstoff
Ni	-	Nickel
O	-	Sauerstoff
P	-	Phosphor
Pb	-	Blei
PVD	-	Physical Vapour Deposition
QFP	-	Querfließpressen
R <sub>Max</sub>	-	Maximale Zahnradradien
R <sub>Min</sub>	-	Minimale Zahnradradien
R <sub>Z</sub>	µm	gemittelte Rautiefe
R <sub>Z,längs</sub>	µm	gemittelte Rautiefe gegen Wälzrichtung
R <sub>Z,quer</sub>	µm	gemittelte Rautiefe in Wälzrichtung
S	-	Schwefel
Si	-	Silizium
Sn	-	Zinn
Ti	-	Titan

<b><i>Symbol</i></b>	<b><i>Einheit</i></b>	<b><i>Beschreibung</i></b>
V	-	Vanadium
VDI	-	Verein Deutscher Ingenieure
VFP	-	Vorwärtsfließpressen
W	-	Wolfram
Zn	-	Zink

# 1 Einleitung

Zahnräder stellen integrale und unverzichtbare Maschinenelemente dar, die in großen Stückzahlen für Getriebe im Maschinenbau und der Automobilindustrie eingesetzt werden. Der Umsatz der in der Antriebstechnik tätigen deutschen Unternehmen betrug 2021 rund 18,6 Mrd. €, hiervon entfielen 40 % auf Verzahnungen und Getriebe [1]. Alleine bis 2026 wird ein Wachstum des weltweiten Absatzmarktes um 33 % erwartet [2]. Ausgelöst wird dies durch einen steigenden Bedarf an Getrieben geringer und mittlerer Leistung, die in der Medizintechnik [3] und im Fahrzeugbau [4] zur Elektrifizierung von Lenk- und Fahrwerksfunktionen, Fenster- und Sitzverstellung sowie für Klimaanlage eingesetzt werden. Zudem werden vermehrt kosteneffiziente Antriebslösungen in der Produktion infolge zunehmender Automatisierung [5] und der Forderung nach flexiblen, dezentralen Lösungen im Sinne der Industrie 4.0 benötigt [6].

Für Anwendungen im niedrigen und mittleren Leistungsbereich ist der Einsatz trockenlaufender Zahnradgetriebe vielversprechend, um Kosten in Herstellung und Betrieb einzusparen [7]. Der Verzicht auf Schmierstoffe wird zudem wegen funktioneller Aspekte in der Medizintechnik und Lebensmittelindustrie sowie aus ökologischen Gründen gefordert [3]. Die Paarung Metall-Kunststoff bietet in diesem Zusammenhang Potential aufgrund der selbstschmierenden Eigenschaften, einem verbesserten Dämpfungs- und Schwingungsverhalten sowie der Möglichkeit der Gewichtseinsparung [7]. Im Betrieb tritt allerdings Verschleiß auf, wodurch die Einhaltung der funktionsrelevanten Toleranzen und die Lebensdauer des Getriebes begrenzt werden [8]. Aus diesen Gründen ist die Reduzierung des Verschleißes von entscheidender Bedeutung. Innerhalb der Paarung Metall-Kunststoff beeinflussen die Eigenschaften des festeren metallischen Partners das Verschleißverhalten wesentlich, weshalb dessen fertigungsbedingten Bauteileigenschaften eine entscheidende Bedeutung zu kommt.

Konventionell werden spanende Verfahren zur Herstellung metallischer Verzahnungen eingesetzt [9]. Im Hinblick auf ökonomische und ökologische Aspekte bietet das Kaltfließpressen aufgrund kürzerer Prozesszeiten und erhöhter Materialeffizienz allerdings eine vielversprechende Alternative [10]. Zudem weisen fließgepresste Bauteile infolge der umforminduzierten Verfestigung und Oberflächeneinglättung gute mechanische Eigenschaften und eine hohe Oberflächengüte auf [11]. Die gezielte Beeinflussung der umforminduzierten Bauteileigenschaften bietet Potential zur Herstellung von einsatzfertigen, betriebsangepassten Zahnrädern [12].

Herausforderungen sind die gegenüber der konventionellen Herstellung limitierte erzielbare Verzahnungsgenauigkeiten [13]. Zudem führen hohe Werkzeugbeanspruchungen zu einer reduzierten Lebensdauer der Fließpressmatrize, wodurch die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens begrenzt wird [14]. Hinsichtlich der Anwendung in der Materialpaarung Metall-Kunststoff bestehen unzureichende Erkenntnisse zum Einfluss der umforminduzierten Eigenschaften der metallischen Verzahnung auf das Verschleißverhalten sowie dem Einsatz von Nichteisen- und Leichtmetallen.

Vor diesem Hintergrund fokussiert diese Arbeit auf die Erarbeitung funktionaler Zusammenhänge zwischen den umforminduzierten Bauteileigenschaften fließgepresster Zahnräder und dem Verschleißverhalten in der Paarung mit einem Polymerzahnrad. Zudem werden Einflussgrößen innerhalb des Fließpressprozesses untersucht und Methoden zur gezielten Beeinflussung der Bauteileigenschaften erarbeitet. Ziel ist die Schaffung eines grundlegenden Verständnisses zum Fließpressen betriebsangepasster Verzahnungen für den Einsatz in der Materialpaarung Metall-Kunststoff, wodurch eine Verbesserung des Verschleißverhaltens angestrebt wird. Zu diesem Zweck wird ein Referenzprozess zur Verzahnungsherstellung durch Voll-Vorwärtsfließpressen numerisch modelliert und experimentell validiert. Die Untersuchung des Verschleißverhaltens erfolgt im Modellversuch sowie auf einem Getriebeprüfstand, wobei zur gezielten Eigenschaftsvariation auch drahterodierte und wärmebehandelte Zahnräder eingesetzt werden. Um die auftretenden Verschleißmechanismen zu identifizieren, werden der lokale Verschleiß der Zahnflanke sowie die Topografie und Verlustwärme analysiert.

Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse wird durch die Untersuchung verschiedener anwendungsrelevanter metallischer Werkstoffe in der Paarung mit einem unverstärkten sowie einem faserverstärkten Polymerwerkstoff unter unterschiedlichen Lastniveaus sichergestellt. Abschließend werden anwendungsrechte Empfehlungen abgeleitet. Durch diese sollen die Material- und Energieeffizienz bei der Verzahnungsherstellung durch Vorwärtsfließpressen gegenüber konventionellen Verfahren gesteigert werden. Zudem wird durch eine Reduktion des Verschleißes von Metall-Kunststoffpaarungen eine Steigerung der Lebensdauer und somit ein erhöhtes ökologisches sowie ökonomisches Potential dieser Getriebetypen angestrebt.

## **2 Stand der Technik und Forschung**

Im Rahmen dieser Arbeit wird der Einsatz fließgepresster metallischer Zahnräder in der Materialpaarung Metall-Kunststoff untersucht. Im folgenden Kapitel werden die nach Stand der Technik vorhandenen Erkenntnisse sowie die zur Durchführung der Forschungsarbeit erforderlichen Grundlagen zusammengefasst. Zunächst wird auf trockenlaufende Zahnradgetriebe und deren Potentiale sowie Herausforderungen eingegangen. Es wird ein Überblick über die in bisherigen Forschungsarbeiten identifizierten Verschleißmechanismen, die eingesetzten Materialkombinationen und Methoden zur Charakterisierung des Verschleißverhaltens gegeben. Zudem werden bisher vorliegende Forschungsergebnisse hinsichtlich des Einflusses der fertigungsbedingten Bauteileigenschaften der metallischen Verzahnung auf den Verschleiß der Materialpaarung Metall-Kunststoff dargelegt.

Anschließend erfolgt eine Bewertung des Kaltfließpressens das, wie von MERKLEIN ET AL. gezeigt, aufgrund der ökonomischen und ökologischen Vorteile sowie der erzielbaren Bauteileigenschaften eine vielversprechende Möglichkeit zur Fertigung einsatzfertiger Verzahnungen bietet [10]. In diesem Zusammenhang wird auf das umforminduzierte Eigenschaftsprofil fließgepresster Zahnräder und Ansätze zur gezielten Beeinflussung der Bauteileigenschaften eingegangen. Abschließend wird der resultierende Forschungsbedarf bezüglich funktionaler Zusammenhänge zwischen den umforminduzierten Bauteileigenschaften und dem Verschleißverhalten sowie Methoden zur betrieboptimierten Herstellung metallischer Verzahnungen bewertet und die Zielsetzung der Arbeit abgeleitet.

### **2.1 Trockenlaufende Zahnradgetriebe der Materialpaarung Metall-Kunststoff**

Zahnradgetriebe sind die wichtigsten Konstruktionselemente zur Leistungsübertragung [15]. Aufgrund ihrer hohen Effizienz, Leistungsdichte und Betriebssicherheit werden sie gegenüber anderen mechanischen Antrieben wie Gelenkgetrieben, Ketten- oder Riemenantrieben am häufigsten eingesetzt [16]. Infolge unterschiedlicher Anforderungen existieren verschiedene Bauformen, wobei hauptsächlich Stirnrad-, Kegelrad-, Planeten- und Schneckengetriebe zur Anwendung kommen [17]. Eine wesentliche Bedeutung kommt Stirnrädern mit evolventischem Zahnprofil aufgrund ihrer einfachen und robusten Bauweise [16], sowie der gleichmäßigen Drehmomentübertragung [18] zu. Vorteilhaft ist zudem der gegenüber anderen

Getriebetypen reduzierte Fertigungsaufwand [15] die erhöhte Tragfähigkeit [18] sowie der hohe Wirkungsgrad aufgrund der vergleichsweise kleinen Kontaktflächen und geringen Gleitanteile bei der Bewegungsübertragung [15].

### **Funktionen und Anforderungen an die Verzahnungsgenauigkeit**

In Abhängigkeit der Funktion werden Lauf- und Mitnahmeverzahnungen unterschieden [15]. Als Laufverzahnung werden schnelllaufende, gerad- oder schrägverzahnte Außen- und Innenverzahnungen bezeichnet, die zur Drehmoment- und Drehzahlübertragung eingesetzt werden [16]. Bei Mitnahmeverzahnungen handelt es sich um innen- oder außenverzahnte Profilverzahnungen, die als Nebenformelemente an Wellen oder Naben angebracht werden. An Laufverzahnungen werden hohe Anforderungen, insbesondere aufgrund der geforderten Leistung, Lebensdauer und Laufruhe gestellt [15]. Im Allgemeinen sind für Drehmoment und Drehzahl übertragende Getriebe höhere Abweichungen zulässig als für Stellgetriebe, von denen eine spielfreie und präzise Positionieraufgabe gefordert wird [15]. Für metallische Leistungsgetriebe mit sehr hohen Anforderungen - beispielsweise im Automobilbau - werden Qualitäten der Stufe 6 nach ISO 1328 [19] vorausgesetzt [20]. Für sonstige Stell- und Leistungsgetriebe, für die auch die Materialpaarung Metall-Kunststoff geeignet ist [21], wird die Qualitätsstufe 8 bei hohen, Stufe 9-10 bei normalen und Stufe 11-12 bei geringen Anforderungen gefordert [22]. Aufgrund des elastischen Verhaltens von Kunststoffen werden Verzahnungsabweichungen leichter ausgeglichen, weshalb bei Kunststoffzahnradern die zulässigen Qualitäten ein bis zwei Stufen weniger genau gewählt werden können [21]. Vor diesem Hintergrund kommt der Fertigungsgenauigkeit der metallischen Verzahnung eine entscheidende Bedeutung zur Einhaltung der funktionsrelevanten Toleranzen zu.

### **Eingriffsverhalten und resultierende Beanspruchung**

Die Abmessungen eines Stirnrads mit Evolventenverzahnung werden durch die maßgebenden Größen Modul  $m$  und die Zähnezah  $z$  sowie die Zahnradbreite  $b$  vorgegeben [23]. Aus Modul und Zähnezah ergibt sich der Teilkreisdurchmesser  $d$  des Zahnrad, der bei spielfreier Paarung beider Zahnrad und ohne Modifikation des Betriebseingriffswinkel dem Wälzkreis der Verzahnung entspricht [15]. Die Bewegungsübertragung über die Zahnflanke erfolgt entlang der Eingriffsstrecke vom Fußnutzkreis bis zum Kopfnutzkreisdurchmesser [17]. Das Eingriffsverhalten und die resultierende lokale Beanspruchung sind abhängig von der Zahngeometrie. Je nach Zahngeometrie führt das Kontaktverhalten zu einer Überdeckung

von einem oder zwei Zahnpaaren, die sich gleichzeitig im Eingriff befinden. Um eine gleichförmige Bewegungsübertragung sicherzustellen, ist es erforderlich, dass zu jedem Zeitpunkt mindestens ein Zahnpaar im Eingriff ist [15]. Bild 1 zeigt das Eingriffsverhalten einer Evolventenverzahnung und die daraus resultierende Eingriffsstrecke von Zahn 1.

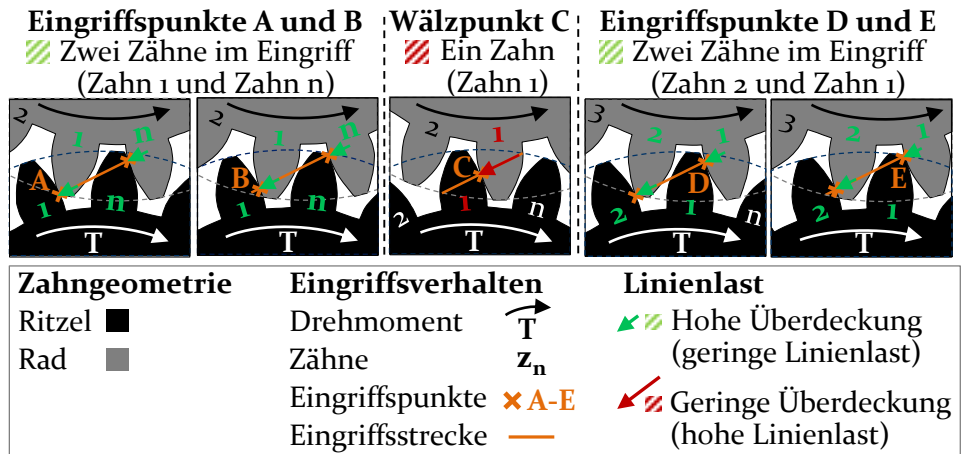


Bild 1: Schematisches Eingriffsverhalten einer Evolventenverzahnung

Im Eingriffspunkt A von Zahn 1 ist der nebenliegende Zahn n noch im Eingriff (Überdeckung = 2). Die beiden Zahnpaare sind gleichzeitig bis zum Eingriffspunkt B im Eingriff. An diesem Punkt ist der Zahn n des Ritzels in Kontakt mit dem Zahnkopf des Rads und verliert den Kontakt bei weiterer Rotation der Paarung. Ab diesem Punkt ist das Zahnpaar 1 allein in Kontakt, und es gibt keine Überschneidung mit anderen Zähnen (Überdeckung = 1). Dies führt zu einer hohen Linienlast an Zahn 1. Im Wälzpunkt C findet reines Wälzen statt [15], und die relative Gleitgeschwindigkeit von Rad und Ritzel beträgt Null. Bei weiterer Drehung bis zum Eingriffspunkt D von Zahn 1 kommt der nächste Zahn 2 des Ritzels mit dem Kopf des Rads in Kontakt. Durch die Überdeckung der Zahnpaare 1 und 2 (Überdeckung = 2) wird die Linienlast der einzelnen Zähne wieder reduziert. Der Eingriffspunkt E von Zahn 1 entspricht dem Eingriffspunkt B von Zahn 2.

Die entlang der Zahnflanke wirkende Linienlast  $F_T$  berechnet sich aus dem Drehmoment  $T$ , dem Durchmesser  $d$  und der Zahnbreite  $b$  [18].

$$F_T = \frac{\left(\frac{2 \cdot T}{d}\right) \cdot 1000}{b} \quad (1)$$

Die Gleitbeanspruchung resultiert aus einer Relativgeschwindigkeit der beiden Zahnflanken aufgrund unterschiedlicher Tangentialgeschwindigkeiten. Die Umfangsgeschwindigkeit  $v_t$  ergibt sich aus der Drehzahl  $n$  und dem Zahnraddurchmesser  $d$  [18].

$$v_{t1} = \frac{d_1 * \pi * n_1}{60 * 1000} \quad v_{t2} = \frac{d_2 * \pi * n_2}{60 * 1000} \quad (2)$$

Mit Hilfe der Umfangsgeschwindigkeit und des Eingriffswinkels  $\alpha=20^\circ$  wird die Tangentialgeschwindigkeit  $w$  entlang der Eingriffsstrecke  $g_y$  berechnet [18].

$$w_1(g_y) = v_{t1} * \left(\frac{\sin \alpha \pm g_y}{\frac{d_1}{2}}\right) \quad w_2(g_y) = v_{t2} * \left(\frac{\sin \alpha \pm g_y}{\frac{d_2}{2}}\right) \quad (3)$$

Die Gleitgeschwindigkeiten  $v_{g1}$  des Ritzels und  $v_{g2}$  des Rads entlang der Position  $g_y$  auf der Eingriffsstrecke werden aus der Differenz der beiden Tangentialgeschwindigkeiten berechnet [18].

$$v_{g1} = w_1(g_y) - w_2(g_y) \quad v_{g2} = w_2(g_y) - w_1(g_y) \quad (4)$$

Die aus dem Gleiten resultierende Beanspruchung wird durch das spezifische Gleiten  $s$  beschrieben, das aus dem Verhältnis der Gleitgeschwindigkeit zur Radialgeschwindigkeit berechnet wird [18].

$$s_1 = \frac{v_{g1}}{w_1(g_y)} \quad s_2 = \frac{v_{g2}}{w_2(g_y)} \quad (5)$$

Die Verschiebung des Eingriffspunktes über die Eingriffsstrecke führt zu einer variierenden Gleitgeschwindigkeit und Linienlast aufgrund der veränderten Hebelwirkung von Zahnfuß bis Zahnkopf. Linienlast und Gleitgeschwindigkeit nehmen in Richtung des Zahnkopfes zu. Zudem bewirkt die Überdeckung von einem oder zwei Zahnpaaren eine Verdoppelung oder Halbierung der Linienlast. Im Wälzpunkt C tritt eine reine Wälzbeanspruchung auf und das spezifische Gleiten beträgt null.

In bisherigen Untersuchungen zum Verschleiß der Materialpaarung wurde das Verschleißminium am Wälzpunkt aufgrund der dort ausbleibenden Gleitbeanspruchung von SENTHILVELAN ET AL. bestätigt [24]. Zudem konnte ein Anstieg des Verschleißes in zunehmender Entfernung zum Wälzpunkt festgestellt werden, der von FEULNER auf die kombinierte Beanspruchung aus Linienlast und Gleitgeschwindigkeit zurückgeführt wurde [25]. Es erfolgte jedoch keine vollständige, hochauflösende Messung der Zahnflanke, sondern lediglich optische Auswertungen an einzelnen Punkten [25]. Zur Ermittlung des Einflusses eines aufgrund einer variierenden Beanspruchung lokal unterschiedlichen Verschleißes ist eine komplette Erfassung der Zahnflanke mit hoher Auflösung erforderlich.

### 2.1.1 Verschleißverhalten

Das Reibungs- und Verschleißverhalten wird durch das Beanspruchungskollektiv und die Elemente des tribologischen Systems bestehend aus Grundkörper, Gegenkörper, Zwischenstoff und Umgebungsmedium, beeinflusst [26]. Reibung äußert sich durch einen Widerstand gegen die Relativbewegung der Körper, der an den Berührflächen entsteht und tangential zu diesen wirkt [27].

#### Verschleißmechanismen

Verschleiß ist definiert als fortschreitender Materialabtrag aus der Oberfläche eines festen Körpers durch mechanische oder chemische Beanspruchung [27]. Die innerhalb eines tribologischen Systems auftretenden Verschleißmechanismen werden nach BOWDEN UND TABOR durch die physikalischen und chemischen Wechselwirkungen im Kontaktbereich bestimmt [28]. Beanspruchungen, die durch Kräfte oder Energieeintrag hervorgerufen werden und Rissvorgänge oder Stoffabtrennungen bewirken, werden als Oberflächenzerrüttung und Abrasion bezeichnet [29]. Das Auftreten chemischer Bindungen durch atomare und molekulare Wechselwirkungen der Kontaktpartner, führt zu Adhäsion und tribochemische Reaktionen [30].

Adhäsion ist, wie von RABINOWICZ gezeigt, auch bei Einsatz von Schmierung und Wahl geeigneter Kontaktpartner nicht vollständig vermeidbar [30]. Die in Kontakt stehenden Rauheitsspitzen der Körper werden unter den wirkenden Normal- und Tangentialspannungen deformiert, wobei vorhandene Oberflächenschichten zerstört und adhäsive Grenzflächenbindungen in Abhängigkeit der tribologischen Kompatibilität der Kontaktpartner gebildet werden [31]. Bei weiterer Relativbewegung erfolgt neben der Entstehung von Reibungswärme die Trennung der Bindungen, wodurch Verschleißpartikel zurückbleiben oder ein Materialübertrag vom weicheren auf den härteren Partner erfolgt [32].

In Paarungen, in denen der Gegenkörper härter und rauher als der beanspruchte Grundkörper ist, kommt es zur Abrasion [28]. In Abhängigkeit davon, ob freigesetzte harte Partikel in der Grenzfläche der Kontaktkörper abrasiv wirken, wird diese nach ACHARD als 2-Körper oder 3-Körper-Abrasion bezeichnet [33]. Es treten verschiedene Formen abrasiven Verschleißes auf [33]. Beim Mikropflügen wird der Werkstoff des weicheren Kontaktkörpers durch den härteren Gegenkörper plastisch verformt und Material in Furchen angehäuft, es resultiert allerdings kein Materialabtrag [33]. Dagegen wird beim Mikrospanen aufgrund Rauheitsspitzen des härteren

Partners Material spanend abgetragen [33]. Zum Mikrobrechen kommt es an spröden Oberflächen durch Rissbildung, die zum Ausbrechen größerer Verschleißpartikel führt [33]. Die Widerstandsfähigkeit von Metallen [34] und Kunststoffen [35] gegen abrasiven Verschleiß wird durch deren Härte beeinflusst. Von LANCASTER wurde gezeigt, dass Polymer gegenüber Metallen gleicher Härte, eine erhöhte Verschleißfestigkeit gegen Abrasion aufweisen und beim Ausbrechen von Partikeln weniger scharfe Kanten entstehen [36].

BURWELL beschrieb erstmals die Oberflächenzerrüttung, die bei hoher, zyklischer Druck- oder Zugbelastung von Oberflächen, welche im Wälzkontakt zueinander stehen, folgt [28]. Die Beanspruchung führt zu einer Werkstoffermüdung, die von der Amplitude der Beanspruchung und der Anzahl an Zyklen abhängig ist [37]. Tribochemische Reaktionen treten an der Oberfläche auf und führen zur Bildung von Zwischenschichten, beispielsweise Oxidschichten, die durch der Relativbewegung der Kontaktpartner zerstört werden [28].

### **Charakterisierungsversuche**

Zur Ermittlung des Verschleißverhaltens tribologischer Systeme werden Betriebs- sowie Modellversuche eingesetzt [26]. Betriebsversuche beinhalten Feldversuche, sowie die Untersuchung von Baugruppen unter praxisnahen Bedingungen auf einem Prüfstand [38]. Hierbei bleibt die Systemstruktur und Beanspruchungsart des zu prüfenden Systems erhalten und es wird lediglich eine Generalisierung des Beanspruchungskollektives vorgenommen [26]. Dagegen werden Modellversuche mit abstrahierten Probekörpern durchgeführt, die eine Vereinfachung der realen Baugruppe sowie deren Beanspruchung darstellen [26]. Vorteile von Modellversuchen sind ein verkleinerter Versuchsaufbau, geringere Kosten für die Probekörper, kürzere Prüfzeiten und eine verbesserte Zugänglichkeit des tribologischen Kontaktbereichs [38]. Allerdings ist die Übertragbarkeit aufgrund der Vereinfachungen wie von KÜNKELE gezeigt auf die Ableitung qualitativer Aussagen in Bezug auf die auftretenden Verschleißmechanismen begrenzt [39].

Getriebeprüfstände ermöglichen die Untersuchung des Verschleißverhaltens unter betriebsnahen Bedingungen [26], wobei meist eine Reduzierung auf eine Getriebestufe erfolgt [15]. Im Gegensatz zu Modellversuchen wird der Zahnkontakt und somit das Wälz- und Gleitverhalten abgebildet. Aufgrund des erhöhten Versuchsaufwandes durch aufwendige Probenfertigung und lange Versuchszeiten erfolgt die Untersuchung der Materialpaarung Metall-Kunststoff in der Literatur überwiegend in Modellversuchen.

Die Quantifizierung des Zahnverschleißes erfolgt in der Regel anhand der Abnahme des Zahnradgewichtes [40], der Veränderung der Zahnweite [25] oder durch optische Bestimmung [41]. Anhand des Gewichtsverlustes kann auf das Verschleißvolumen geschlossen werden, es ist jedoch keine örtliche Auflösung des Verschleißes möglich. Die Zahnweite als Prüfmaß nach DIN 3960 [42] korreliert mit der Zahndicke, lässt allerdings ebenfalls keinen Rückschluss über den lokalen Verschleiß zu. Die Veränderung der Form der Zahnflanke kann über optische Auswertungen erfasst werden, allerdings ist für eine hohe Genauigkeit ein beträchtlicher Aufwand für die Probenpräparation und graphische Auswertung erforderlich [25].

Beim Stift-Scheibe- und Zwei-Scheiben-Versuch handelt es sich um Modellversuche mit einfachen Probekörpern, die gegenüber einer Zahnradpaarung einen hohen Abstraktionsgrad aufweisen [43]. Im Stift-Scheibe-Versuch stellt ein stiftförmiger Probekörper den Grundkörper und eine Scheibe den Gegenkörper dar [26]. Der stationäre Stift wird mit einer festgelegten Normalkraft auf die mit definierter Geschwindigkeit rotierende Scheibe gedrückt, woraus eine Gleitbeanspruchung im flächigen Kontaktbereich resultiert [38]. Im Unterschied zur Gleit- und Wälzbeanspruchung der Zahnradpaarung [15], wird im Stift-Scheibe-Versuch lediglich eine Gleitbeanspruchung abgebildet. Da reines Wälzen aber nur im Wälzpunkt der Zahnradpaarung auftritt, sind die Gleitanteile maßgeblich für die Verschleißbeanspruchung [18]. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse vom Stift-Scheibe-Versuch auf eine Getriebepaarung wurde von MERTENS ET AL. nachgewiesen [40]. Demgegenüber tritt im Zwei-Scheiben-Versuch ein Linienkontakt zwischen zwei rotierenden Scheiben, die mit einer definierten Normalkraft gegeneinander gedrückt werden, auf [44]. Durch Variation der Drehzahlen beider Scheiben kann sowohl eine ideale Wälzbeanspruchung, als auch ein infolge von Schlupf resultierende Gleitbeanspruchung untersucht werden [44]. Dies ermöglicht die dedizierte Abbildung unterschiedlicher Beanspruchungssituationen, die entlang der Eingriffsstrecke einer Zahnradpaarung resultieren.

### 2.1.2 Materialkombinationen

Das Auftreten des bei Zahnradgetrieben kritischen Gleitverschleißes [17] ist abhängig von der tribologischen Kompatibilität der Kontaktpartner [45]. Bei geringer Kompatibilität bilden die in Kontakt stehenden Oberflächen Grenzflächenbindungen aus, die unter ungeschmierten Bedingungen zu adhäsivem Verschleiß führen [46]. Bei Paarung identischer Metalle wurden

von RABINOWICZ deshalb hohe Verschleißraten festgestellt, die bei erhöhter tribologischer Kompatibilität der Metallwerkstoffe reduziert werden [46]. Minimaler adhäsiver Verschleiß resultiert bei artungleichen Paarungen, beispielsweise von Nichtmetallen mit Metallen oder Nichtmetallen [46]. Innerhalb der Paarung Metall-Kunststoff bewirken Van-der-Waals Kräfte nach BUCKLEY adhäsive Bindungen und führen zum Herausbrechen von Kunststoffpartikeln sowie zu einem Materialtransfer auf die Metalloberfläche [32].

### **Artgleiche Paarungen**

Aufgrund der hohen Festigkeit gegenüber Polymerwerkstoffen, ermöglichen Metall-Metall Paarungen eine hohe Tragfähigkeit [47]. Eingesetzt wird Stahl in Kombination mit Stahl-, Messing- oder Aluminiumlegierungen [48]. Es resultiert allerdings starker Verschleiß im Trockenlauf, insbesondere bei hohen Drehzahlen [48]. In Abhängigkeit der tribologischen Kompatibilität treten adhäsive, aber auch abrasive Verschleißmechanismen bei hohem Härtegradienten der Werkstoffe auf [49]. Die Kombination zweier Gleitpartner aus Kunststoff ermöglicht die Einsparung von Gewicht und Werkstoff- sowie Fertigungskosten gegenüber metallischen Paarungen [7]. Bei Einsatz von Kunststoffzahnradern resultiert aufgrund des elastischen Verhaltens zudem eine größere Kontaktfläche, weshalb die Überdeckung erhöht wird [50]. Die mechanischen Eigenschaften von Kunststoffen sind allerdings stark temperaturabhängig, weshalb die entstehende Verlustwärme in der Paarung zu einer Reduzierung der Lebensdauer führt [8]. Neben einer erhöhten Zahnverformung aufgrund eines abnehmenden E-Moduls [50], kommt es bei starker Temperaturerhöhung zum Aufschmelzen der Zahnflanken, da die geringe Wärmeleitfähigkeit von Kunststoffen keine ausreichende Wärmeabfuhr ermöglicht [25]. Die Paarung eignet sich somit nur für niedrige Leistungsanforderungen und weist bei der Bewegungsübertragung eine begrenzte Genauigkeit auf [7].

### **Artungleiche Paarungen**

Für niedrige bis mittlere Leistungsanforderungen bietet die Paarung Metall-Kunststoff wesentliches Potential, da die spezifischen Vorteile beider Werkstoffe kombiniert werden [7]. Gegenüber rein metallischen Paarungen ermöglicht der Einsatz von Polymerwerkstoffen, aufgrund ihrer selbstschmierenden Eigenschaften, die Lebensdauer im Trockenlauf zu steigern [7]. Zudem wird ein verbessertes Dämpfungs- und Schwingungsverhalten sowie eine Gewichtseinsparung erreicht [8]. Allerdings begrenzt der Verschleiß die Einhaltung funktionsrelevanter

Toleranzen und die Lebensdauer der Paarung [40], weshalb der Reduzierung der Verschleißrate eine entscheidende Bedeutung zukommt.

Im Folgenden wird auf die bisherigen Forschungsarbeiten zur Materialpaarung Metall-Kunststoff eingegangen. Tabelle 1 zeigt einen Überblick der eingesetzten Metallwerkstoffe und untersuchten Einflüsse.

Tabelle 1: Untersuchungsaspekte bisheriger Forschungsarbeiten der Paarung Metall-Kunststoff [51], [43], [25], [39], [52], [53], [40, 54], [55, 56], [7, 57], [50], [58], [59], [41]

	Chen [51]	Evans [43]	Feulner [25]	Künkel [39]	Kulkarni [52]	Mbarek [53]	Mertens [40,54]	Pogačnik [55,56]	Singh [7,57]	Takahashi [50]	Tsukamoto [58]	Wieleba [59]	Zorko [41]
<b>Modellsystem</b>													
Getriebe			x				x		x	x	x		x
Stift-Scheibe		x		x	x			x				x	
Zwei-Scheibe	x					x							
<b>Metallwerkstoff</b>													
Stahl	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x
Edelstahl							x	x					
Messing	x										x		
Aluminium	x									x			
<b>Untersuchte Einflussgrößen</b>													
Metallwerkstoff, Härte	x				x				x	x	x	x	
Metalloberfläche	x			x			x	x				x	
Lastfall		x	x	x	x	x		x			x		x
Zahngeometrie										x			

Als Polymerwerkstoffe kommen Polyamid (PA), Polyoxymethylen (POM) und Polyetheretherketon (PEEK) zur Anwendung [7]. Aufgrund der hohen Verschleißfestigkeit, des niedrigen Reibungskoeffizienten und der guten mechanischen Eigenschaften wird vorwiegend Polyamid eingesetzt [7]. Als metallischer Partner werden überwiegend Stähle gewählt, wobei Edelstähle (X5CrNiMo17 [54], X105CrMo17 [56]), legierte (34CrNiMo6, 42CrMo4) [51] sowie unlegierte (C45), [53] Vergütungsstähle untersucht wurden. Trotz der spezifischen Vorteile von Messing, wie einer hohen Korrosionsbeständigkeit und Wärmeleitfähigkeit [17], liegen bisher lediglich vereinzelt Untersuchungen des Einsatzes in der Materialpaarung vor. Potential für den Einsatz von Aluminium ergibt sich aufgrund der

geringen Dichte sowie der hohen Wärmeleitfähigkeit, die Anwendung in der Materialpaarung wurde bisher jedoch nicht systematisch untersucht.

### 2.1.3 Einflüsse auf den Verschleiß

Nachfolgend werden die in bisherigen Forschungsarbeiten (Tabelle 1) identifizierten Einflussgrößen auf das Verschleißverhalten der Materialpaarung Metall-Kunststoff zusammengefasst. Hierbei wird auf den Einfluss der Eigenschaften des metallischen Partners, des Lastfalls sowie der Zahngeometrie eingegangen.

#### Metallwerkstoff und Härte

Im Zwei-Scheiben-Versuch wurde von CHEN ET AL. für Aluminium (AlCu6BiPb) und Messing (CuZn37Pb2) im Vergleich zu Stahl (34CrNiMo6) ein geringerer Verschleiß des Kunststoffpartners (PA66) festgestellt [51]. Die Untersuchung deutet auf das Potential des Einsatzes von Leicht- und Nichteisenmetallen hin, jedoch sind keine generellen Aussagen zum Werkstoffeinfluss möglich, da die Werkstoffe stark variierende Festigkeiten sowie unterschiedliche Oberflächentopografien im Ausgangszustand aufwiesen und weder die Veränderung der Oberfläche noch die auftretenden Verschleißmechanismen oder die Ausbildung eines Transferfilms ermittelt wurden [51]. Zudem erfolgte keine Berücksichtigung des am metallischen Prüfkörper resultierenden Verschleißes [51]. Die Ergebnisse von CHEN ET AL. [51] stehen auch im Widerspruch zu denen von TAKAHASHI ET AL. [50], die bei Untersuchungen einer Metall-Polyamid Zahnradpaarung einen erhöhten Gesamtverschleiß bei Verwendung von Aluminium (AlMgSi1), sowie ein Versagen des Aluminiumzahnrad feststellten, weshalb weitere Untersuchungen erforderlich sind.

Der Einfluss der Härte wurde lediglich für Stahlwerkstoffe grundlegend untersucht. Bei Einsatz von hochfesten Stählen wurde von WIELEBA ein geringerer Verschleiß bei sehr hoher Härte festgestellt, da durch die erhöhte Adhäsionsneigung die Ausbildung eines verschleißmindernden Transferfilms begünstigt wird [59]. Für die Untersuchungen wurde allerdings vergüteter Stahl mit einer Härte von 300 bis 600 HV verwendet, weshalb die Ergebnisse nicht auf Werkstoffe mit geringer Festigkeit übertragbar sind [59]. Unlegierte Stahlwerkstoffe wurden von CHEN ET AL. im Zwei-Scheiben Versuch bei einer kombinierten Wälz- und Gleitbeanspruchung geprüft, wobei ein deutlich erhöhter Verschleiß gegenüber der Verwendung höher legierter Stähle festgestellt wurde [51].

## **Oberfläche**

Die metallische Oberflächenrauheit beeinflusst, wie von BUCKLEY gezeigt, den auftretenden Verschleißmechanismus [32], während die Ausgangsoberfläche des Polymerrads aufgrund der vergleichsweise geringen Festigkeit vernachlässigbar ist [51]. In Abhängigkeit der Rauheit der Kontaktpartner treten die Verschleißmechanismen Adhäsion und Abrasion auf [32]. Der Einfluss der initialen Oberflächenrauheit von Stahl wurde von KÜNKEL [39] und WIELEBA [59] im Stift-Scheibe-Versuch ermittelt, wobei eine verschleißbedingte Veränderung der Oberfläche nicht berücksichtigt wurde. KÜNKEL identifizierte die Rautiefe  $R_z$  als relevanten Oberflächenkennwert und ermittelte ein Rauheitsoptimum im Kontakt mit verschiedenen Polymerwerkstoffen [39]. POGAČNIK ET AL. [56] untersuchte ebenfalls die Auswirkung unterschiedlicher Rautiefen von Stahl im Stift-Scheibe-Versuch und stellte Materialanhaftung und Transferfilmbildung bei geringer Rauheit sowie abrasiven Verschleiß bei hoher Rauheit fest. In Getriebeversuchen wurde der Einfluss unterschiedlicher Oberflächenrauheiten von Stahlritzeln von MERTENS ET AL. [40] untersucht und ein zunehmender abrasiver Verschleiß bei erhöhter Rauheit bestätigt.

## **Lastfall**

Der Verschleiß der Materialpaarung wird durch eine zunehmende Flächenpressung und Gleitgeschwindigkeit erhöht, wie POGAČNIK UND KALIN [56] sowie KULKARNI UND ELANGO VAN [52] im Stift-Scheibe-Versuch beim Einsatz von Vergütungsstählen und PA66 feststellten. Die Erkenntnisse wurden von FEULNER [25] und ZORKO ET AL. [41], die den Einfluss von Drehmoment und Drehzahl am Getriebeprüfstand untersuchten, bestätigt. In Folge eines erhöhten Kontaktdruckes tritt verstärkter abrasiver Verschleiß auf [56]. Bei zunehmender Gleitgeschwindigkeit bewirkt der erhöhte Energieeintrag nach POGAČNIK UND KALIN einen Temperaturanstieg, der bei unzureichender Wärmeabfuhr zum adhäsiven Verschleiß des Kunststoffpartners bis hin zum thermischen Versagen führt [56]. Von MERTENS UND SENTHILVELAN [54] wurde bestätigt, dass die durch ein metallisches Ritzel verbesserte Wärmeabfuhr gegenüber einer Kunststoff-Kunststoff Paarung die Flankentemperatur und den Verschleiß reduziert.

## **Zahngeometrie**

Der Einfluss von Zähnezahl und Zahnradmodul wurde von TAKAHASHI ET AL. [50] untersucht. Aufgrund einer erhöhten Zähnezahl bei verringertem Modul wird die Überdeckung in der Paarung erhöht [50], wodurch die Gleitbeanspruchung der gleichzeitig im Eingriff befindlichen

Zähne sowie der Verschleiß reduziert werden [50]. Dieser Effekt wurde auch für metallische Zahnradpaarungen von WALTON UND GOODWIN nachgewiesen [60].

#### 2.1.4 Verzahnungsherstellung

Kunststoffzahnäder werden überwiegend durch Spritzguss gefertigt [15], wobei in Abhängigkeit der Anforderungen an die Genauigkeit, die Stückzahl sowie dem Zahnradwerkstoff auch spanende Verfahren eingesetzt werden [21]. Die Prozessschritte des Spritzgießens beinhalten die Plastifizierung des Polymer-Granulats, das Dosieren, das Einspritzen in das formgebende Werkzeug, das Nachdrücken und das Abkühlen sowie Entformen [61]. Zum Spritzgießen eignen sich Thermoplasten, Duroplasten und Elastomere sowie faserverstärkte Kunststoffe [62]. Für tribologische Anwendungen werden thermoplastische, teilkristalline Kunststoffe eingesetzt, die gegenüber amorphen Thermoplasten eine höhere tribologische Beanspruchbarkeit und mechanische Festigkeit aufweisen [63]. Vorteile des Spritzgießens sind die hohe Wirtschaftlichkeit bei großen Stückzahlen, die weitgehende Gestaltungsfreiheit [21] und die Ausbildung eines beanspruchungsgerechten Faserverlaufs, wodurch die Tragfähigkeit erhöht wird [64]. Zudem besteht die Möglichkeit zur Einbringung von Füll- und Verstärkungsstoffen [64]. Beim Erstarren der Schmelze kommt es zur Schwindung, wodurch Inhomogenitäten und Verzug auftreten können, die durch Werkzeugtemperatur und Massedruck beeinflusst werden [21]. Die erreichbaren Genauigkeiten liegen im Bereich der Qualitätsstufe 8-11 [65] nach ISO 1328 [19]. Herstellbar sind sowohl Gerad- als auch Schrägverzahnungen [21].

Die Herstellung metallischer Zahnäder erfolgt konventionell durch spanende Verfahren, insbesondere Wälzfräsen und Wälzstoßen [9]. Hierbei werden Verzahnungsqualitäten bis zu Stufe 6 nach ISO 1328 [19] sowie eine bereits bei geringen Stückzahlen hohe Wirtschaftlichkeit erreicht [15]. Nachteilig sind die niedrige Materialeffizienz, die begrenzte Produktivität sowie geringe Festigkeiten, da durch die trennende Bearbeitung der Faserverlauf unterbrochen wird [12]. Dagegen bietet der Einsatz des Kaltfließpressens ökologische und wirtschaftliche Vorteile und das Potential zur Erzielung verbesserter Bauteileigenschaften [10]. Es liegen bisher allerdings keine Erkenntnisse zum Einsatz umgeformter Zahnäder in der Materialpaarung Metall-Kunststoff vor.

## 2.2 Fließpressen metallischer Zahnräder

Das Fließpressen stellt ein Kernverfahren der Kaltmassivumformung dar [66]. Es wird der Untergruppe des Durchdrückens aus dem Bereich der Druckumformung zugeordnet [67]. Die Umformung erfolgt unter Minderung des Querschnitts durch teilweises oder vollständiges Hindurchdrücken des Werkstoffs durch eine formgebende Werkzeugkavität [68]. Hierbei wird ein Werkstofffluss in Richtung der Stempelbewegung, quer oder entgegengesetzt zu dieser hervorgerufen, wodurch die Unterteilung in Vorwärts-, Quer- und Rückwärtsfließpressen folgt [67]. Es können sowohl Voll- als auch Hohlkörper oder Näpfe umgeformt werden. Die Umformung wird bei Raumtemperatur [67] durchgeführt, es kommt allerdings zu einem Temperaturanstieg aufgrund von Reibung in der Wirkfuge sowie durch die bei der plastischen Formänderung entstehende Verlustwärme [69]. Die Temperatur verändert sich zyklisch, erreicht allerdings in Abhängigkeit der Prozessparameter nach 100 bis 1.000 Umformhüben ein stabiles Niveau [70].

### 2.2.1 Verfahrensarten

Das Vorwärts- und Querfließpressen haben die größte Bedeutung bei der Herstellung von Verzahnungen. Die Verfahren eignen sich zur Fertigung von Voll- und Hohlkörpern mit Innen- und Außenverzahnungen aus stangenförmigem Halbzeug oder Blech [12].

#### Vorwärtsfließpressen

Beim Vorwärtsfließpressen (VFP) fließt der Werkstoff axial in Richtung der Stempelbewegung [68]. Nach der Umformung wird das Werkstück mittels eines Auswerfers in Gegenrichtung ausgeworfen. Herstellbar sind axialsymmetrische Voll- und Hohlkörper mit Gerad- sowie Schrägverzahnung [12]. Die erreichbaren Verzahnungsqualitäten liegen für Geradverzahnungen bei Stufe 8 bis 10 [12], wobei unter Laborbedingungen von SWEENEY Stufe 7 erzielt werden konnte [71]. Bei Schrägverzahnungen werden die Qualitätsstufen 10 und 11 erreicht, was nach LENNARTZ auf Abweichungen der Flankenlinie zurückzuführen ist [72]. Diese werden durch einen aufgrund des Schrägungswinkels tangentialen Werkstofffluss [73] sowie ein Rückfedern der Verzahnung nach dem Auswerfervorgang [74] bedingt. WEISS ET AL. zeigten, dass die Umformung im Wesentlichen auf den Verzahnungsbereich begrenzt ist [14], weshalb in Verbindung mit einer offenen Matrize niedrige Presskräfte resultieren [12]. Dies wirkt sich im Vergleich zum Querfließpressen positiv auf die

Werkzeuglebensdauer aus [72]. Der Stempel wird üblicherweise zylindrisch ausgeführt, wobei der Durchmesser größer als der Fußkreisdurchmesser der Verzahnung gewählt werden muss, um ein Eindringen in die Werkstückoberseite aufgrund hoher Flächenpressungen zu verhindern [72]. Aus diesem Grund ist zur Vermeidung einer Kollision von Stempel und Matrize kein vollständiges Durchdrücken des Rohlings durch die Matrize möglich, weshalb ein nicht umgeformter Rest am Werkstück verbleibt und die Materialausnutzung begrenzt ist. Nachteilig ist zudem die Bildung eines von JEONG ET AL. beschriebenen Einlaufbereichs, der auf der in die Matrize einlaufenden Zahnradstirnseite entsteht und spanend entfernt werden muss [13].

Es existieren Verfahrensvarianten, um die Materialausnutzung zu erhöhen und den Herausforderungen bei der Umformung schrägverzahnter Zahnräder zu begegnen. Durch den Einsatz eines verzahnten Stempels von LENNARTZ wird das vollständige Durchdrücken des Werkstücks ermöglicht [72] und es sind Bauteile mit durchgehender Verzahnung herstellbar. Zur Herstellung von Schrägverzahnungen ist, wie von SWEENEY gezeigt, eine drehbare Lagerung des Stempels nötig [71]. Eine weitere Verfahrensentwicklung, die durch Verzicht auf einen Auswerfervorgang eine potentiell hohe Produktivität bietet, ist das 1975 patentierte „Samanta“-Verfahren [75]. Bei diesem Verfahren werden übereinander gestapelte Rohteile im Paket durch die Matrize gepresst. Die Entwicklung zielte darauf ab, die Umformung ohne Auswerfer zu ermöglichen und die Taktzeit zu verkürzen sowie die Mengenleistung zu erhöhen [76]. Mit dem Verfahren wurden von SAMANTA Zahnräder mit einer Verzahnungsqualität innerhalb der Stufe II hergestellt [75]. Es bildet sich allerdings analog zum konventionellen Voll-Vorwärts-Fließpressen ein Einlauf auf der unteren Stirnseite [77] sowie ein kronenförmiger Grat [78] auf der Oberseite, was eine spanende Nachbearbeitung erforderlich macht.

### **Querfließpressen**

Das Querfließpressen (QFP) zeichnet sich durch einen Materialfluss quer zur Wirkrichtung der Umformmaschine aus [68]. Herstellbar sind sowohl gerade [79] als auch schräge [72] Außenverzahnungen. Es werden Qualitätsstufen im Bereich von 6-9 für Gerad- [71] und 8-10 für Schrägverzahnungen [72] erzielt, wobei bei Schrägverzahnungen ein dort auftretender Flankenlinienfehler ausgenommen ist. SZENTMIHÁLYI stellte fest, dass die Flankenlinienabweichung durch den Auswerfervorgang stark negativ beeinflusst wird [80]. Limitiert wird die Genauigkeit nach SCHMIEDER zudem

durch die elastische Verformung der Matrize [81]. Das Querfließpressen ermöglicht durchgehend verzahnte und gratfreie Bauteile herzustellen. Gegenüber dem Vorwärtsfließpressen werden höhere Qualitätsstufen erreicht, wobei aufgrund der geschlossenen Werkzeugkontur hohe Zuhalte- und Stempelkräfte [77] sowie eine exakte Auslegung des Rohlingvolumens erforderlich sind [12]. SWEENEY zeigte, dass das herstellbare Breiten-Durchmesser Verhältnis begrenzt ist, da bei großer Zahnbreite eine konkave Ausformung auftritt [71].

### 2.2.2 Werkstoffe

Von Werkstoffen für die Kaltmassivumformung werden ein möglichst homogenes Gefüge über den Halbzeugquerschnitt, ein niedriger Fließwiderstand und ein hohes Umformvermögen gefordert [82]. Das Umformvermögen metallischer Werkstoffe ist abhängig von der Gitterstruktur und Gitterfehlern [83] sowie Legierungselementen [84]. Zum Kaltfließpressen eignen sich niedriglegierte Stähle mit geringem Kohlenstoffanteil [82] sowie Nichteisenmetalle wie Messing mit einem Kupferanteil  $> 67,5\%$  [85] und Aluminiumlegierungen [86], die aufgrund ihrer kubisch-flächenzentrierten (kfz) Gitterstruktur ein hohes plastisches Formänderungsvermögen aufweisen. Eine nur sehr begrenzte Eignung zur Kaltumformung weisen dagegen Zink, Titan und Magnesium aufgrund ihrer hexagonalen Gitterstruktur auf [83].

Vor dem Hintergrund des breiten Anwendungsspektrums in metallischen Getrieben liegt der Fokus in bisherigen Forschungsarbeiten zum Verzahnungsfließpressen auf Stahlwerkstoffen. In den Untersuchungen werden Einsatzstähle wie C10 [87] und 16MnCr5 [88] sowie Vergütungsstähle (42CrMo4) [87] mit einem geringem Kohlenstoffgehalt  $< 0,45\%$  eingesetzt, wodurch eine gute Kaltverformbarkeit gegeben ist [82]. Die Stahlwerkstoffe werden zur Erhöhung des Umformvermögens und zur Einstellung eines gleichmäßigen Gefüges wärmebehandelt [89]. Durch Weichglühen wird der nach der Halbzeugherstellung vorhandene lamellare Zementit in körnigen Zementit (Perlit) umgewandelt und die im Walzprozess eingebrachte Kaltverfestigung abgebaut [89]. Durch die Einformung des Zementits in die weiche, ferritische Phase wird die Umformbarkeit verbessert [89].

Aufgrund des - in Abschnitt 2.1 beschriebenen - stetig wachsenden Bedarfs an Getrieben im niedrigen und mittleren Leistungsbereich ergibt sich das Potential für den Einsatz metallischer Zahnräder mit reduzierten Festigkeitsanforderungen in der Materialpaarung Metall-Kunststoff.

Vielversprechend ist in diesem Zusammenhang der Einsatz von Leicht- sowie Nichteisenmetallen. Bisher liegen lediglich vereinzelte Untersuchungen zum Fließpressen von Verzahnungen aus Reinaluminium (Al<sub>99,5</sub>) [90] sowie niedrig- (AlMgSi<sub>0,5</sub>) [81] oder höherlegierten (AlMgSi) [91] Aluminiumwerkstoffen vor. Diese wurden allerdings im lösungsgeglühten Zustand umgeformt. Durch Lösungsglühen werden Ausscheidungen leicht löslicher Elemente wie Magnesium, Silizium, Kupfer oder Zink aufgelöst und gleichmäßig im Gefüge verteilt [92]. Zudem kommt es zur Rekristallisation des Korngefüges durch das Wachstum neuer Kristallkörner, wodurch ein homogenes und weiches Gefüge erzielt wird [92]. Aufgrund der Wärmebehandlung ergeben sich für die Umformung vorteilhafte Eigenschaften durch ein niedriges Fließspannungsniveau und ein hohes Umformvermögen bei lediglich geringer Neigung zur Kaltverfestigung. Im Rahmen der Untersuchungen von JUNG ET AL. [93] und WEISS ET AL. [14] erfolgte keine Auswertung der erzielbaren Bauteileigenschaften der Verzahnung. Von ALVES ET AL. [91] und WANG UND HUANG [90] wurde zwar eine stark reduzierte Formfüllung beim Ausformen der Verzahnung durch Voll-Vorwärtsfließpressen gegenüber Stahl identifiziert, es erfolgte allerdings keine Ermittlung der zugrundeliegenden Wirkzusammenhänge.

### 2.2.3 Potentiale und Herausforderungen

Aufgrund des hohen Produktionsvolumens und des steigenden Bauteilbedarfs in der Antriebs- und Getriebetechnik [2] sowie zunehmender gesetzlicher Restriktionen [94] kommt einer energie- und materialeffizienten Herstellung metallischer Verzahnungen eine wachsende Bedeutung zu. Gegenüber der konventionellen spanenden Herstellung bietet die Kaltmassivumformung wirtschaftliche und ökologische Vorteile [12]. Zudem sind Bauteile mit verbessertem Eigenschaftsprofil herstellbar. Der industriellen Anwendung stehen aber verschiedene bauteil- und prozesseitige Herausforderungen entgegen.

#### Ökologische und wirtschaftliche Vorteile

Im Vergleich zu spanenden Prozessen wird beim Kaltfließpressen aufgrund des Verfahrensprinzips eine bis zu 20 % höhere Materialeffizienz erreicht [13]. Da mehr als 50 % der Bauteilkosten auf die eingesetzten Werkstoffe zurückzuführen sind [95], wird eine deutliche Einsparung ermöglicht. Zudem ist keine Temperierung der Werkzeuge oder Werkstücke erforderlich und durch Nutzung der eingebrachten Kaltverfestigung besteht

das Potential, auf eine nachgelagerte Wärmebehandlung zu verzichten [96]. Die hohe Material- sowie Energieeffizienz bewirkt eine Reduktion des CO<sub>2</sub>-Bedarfs um etwa 45 % im Vergleich zur konventionellen Herstellung [97]. Bei hohen Stückzahlen wirken sich außerdem kurze Taktzeiten sowie die rasche Amortisation der Werkzeugkosten vorteilhaft auf die Wirtschaftlichkeit aus [96].

### **Betriebsangepasste Bauteileigenschaften**

Durch die im Umformprozess resultierende Kaltverfestigung wird eine Steigerung der mechanischen Eigenschaften und eine hohe Oberflächenqualität der Zahnräder erreicht [66]. Die gezielte Nutzung der umforminduzierten Bauteileigenschaften erweitert das Leichtbaupotential [98]. Einerseits ermöglicht eine erhöhte Beanspruchbarkeit der Bauteile innerhalb der Dimensionierung Bauraum und Gewicht einzusparen [99]. Andererseits bietet die aufgrund der Umformung erhöhte Festigkeit das Potential zum Einsatz von Leichtmetallen wie Aluminium [99].

#### *Umforminduzierte Oberfläche und Eigenspannungszustand*

Bei der Kaltmassivumformung treten hohe Kontaktnormalspannungen [100] sowie lange Gleitwege [78] im Werkzeug auf. Da die Matrizen aufgrund einer Nachbearbeitung durch Polieren und aufgebrauchte Beschichtungen eine sehr geringe Rauheit aufweisen, wird die Werkstückoberfläche stark geglättet [101]. Die im Prozess erzielbaren Oberflächenrauhigkeiten liegen in Abhängigkeit des eingesetzten Schmiersystems in einem Bereich von  $R_z 1$  bis  $4 \mu\text{m}$  und weisen eine hohe Reproduzierbarkeit auf [102]. Durch die großen plastischen Formänderungen werden zudem Eigenspannungen induziert [103] und Mikrorisse der Oberfläche geschlossen [104]. Beim Vorwärtsfließpressen werden in der Bauteilmitte Druckeigenspannungen hervorgerufen, wohingegen in oberflächennahen Bereichen Zugeigenspannungen eingebracht werden [103]. Bedingt werden diese durch eine während der Umformung auftretende Zugbeanspruchung in der Bauteilmitte, weshalb dort nach Entlastung Druckeigenspannungen resultieren, die durch Zugspannungen an der Oberfläche ausgeglichen werden [105].

#### *Kaltverfestigung und beanspruchungsgerechter Faserverlauf*

Die plastische Formänderung metallischer Werkstoffe wird maßgeblich durch Versetzungsbewegungen im Kristallgitter ermöglicht [106]. Während der Verformung wird die Bindung des Kristallgitters lokal aufgehoben und es folgt eine Bewegung der Versetzungen entlang der Gitterstruktur [107]. Durch ein Anstauen der Versetzungen an den Korngrenzen (Hall-

Petch-Beziehung) wird die Versetzungsdichte erhöht und eine weitere Bewegung eingeschränkt [108], wodurch der Formänderungswiderstand vergrößert wird. Zudem bewirkt die Umformung eine Veränderung des Werkstoffgefüges und eine ungleichmäßige Verformung der Körner [109]. In Abhängigkeit der Beanspruchung werden die Körner gestreckt oder gestaucht, wodurch richtungsabhängige Bauteileigenschaften resultieren [110]. Es wird ein beanspruchungsgerechter Faserverlauf entlang der Zahnkontur erzeugt [111]. Der Faserverlauf steigert aufgrund der Krafterleitung in Richtung der Faserrichtung und der Reduzierung der Kerbwirkung durch unterbrochene Fasern die dynamische Beanspruchbarkeit [110], was von SILBERNAGEL [112], EXEL [113] und ZIMMERMAN [114] nachgewiesen wurde.

### *Geometrie*

Die umformtechnische Herstellung ermöglicht eine hohe geometrische Gestaltungsfreiheit, insbesondere von axial- und rotationssymmetrischen Bauteilen, sowie die Integration von Nebenformelementen [96]. Dagegen wird bei der spanenden Fertigung die herstellbare Geometrie durch einen erforderlichen Ein- und Auslaufbereich des Verzahnungswerkzeugs begrenzt [12]. Zu vermeiden ist die Ausformung scharfer Kanten, Hinterschneidungen und großer Querschnitts- oder Wanddickenänderungen [96]. Da im Bereich von Zahnkopf und -fuß hohe Umformgrade vorliegen, ist die Wahl ausreichend großer Radien erforderlich, um eine korrekte Ausformung der Zahnkontur zu ermöglichen [115] und Kerbspannungen in der Matrize zu vermeiden [111]. Vergrößerte Fußradien wirken sich positiv auf die Reduktion kritischer Spannungen im Zahnfuß und die Tragfähigkeit der Verzahnung aus [116].

### **Herausforderungen**

Der industriellen Anwendung des Vorwärtsfließpressens zur Verzahnungsherstellung stehen noch wesentliche Herausforderungen entgegen [14]. Diese betreffen die erzielbare Formfüllung und Materialeffizienz [91], die Verzahnungsgenauigkeit [117] und die Werkzeugbeanspruchung [118]. Der Stofffluss zu Prozessbeginn begrenzt die nutzbare Verzahnungsbreite durch eine unzureichende Formfüllung im unteren Werkstückbereich [13]. Ein Grund hierfür ist ein mangelnder Werkzeugkontakt aufgrund einer erhöhten Materialflussgeschwindigkeit beim Eintritt des Werkstoffs in die ungefüllte Matrize [14]. Die Formfüllung wirkt sich auf die erreichbare Genauigkeit sowie die Materialeffizienz aus. Weiterhin verbleibt verfahrensbedingt ein Abdruck des Schulterbereichs der Fließpressmatrize am oberen Werkstückrand, der die Materialeffizienz weiter reduziert [13].

Während der Umformung kommt es aufgrund der zur Kaltumformung erforderlichen hohen Pressenkräfte zu einer elastischen radialen Aufweitung der Fließpressmatrize, wodurch diese gegenüber der Sollgeometrie der Verzahnung ein Materialübermaß aufweist [13]. Die Matrizenaufweitung wurde experimentell von KOLL [76] sowie numerisch von BAUMGARTEN [79] ermittelt. Beim Hochfahren des Stempels nach der Umformung tritt eine elastische Rückfederung von Matrize und Bauteil auf [119]. Bei hohen Werkzeugdehnungen kann es aufgrund starker Rückfederung zu einem nachgelagerten plastischen Fließen im Bauteilrandbereich kommen und die Genauigkeit wird beeinflusst [120]. DUBAR ET AL. zeigten, dass Verschleiß der Matrizenoberfläche die Oberflächengüte und Maßhaltigkeit der Bauteile sowie die Werkzeugstandzeit negativ beeinflussen [121]. Aus diesem Grund ist eine beanspruchungsgerechte Auslegung des Werkzeugsystems [122], eine Reduzierung der auftretenden Beanspruchungen und eine korrekte Auslegung des tribologischen Systems erforderlich [123].

#### **2.2.4 Einflüsse auf die umforminduzierten Bauteileigenschaften**

Die gezielte Beeinflussung der umforminduzierten Bauteileigenschaften und die Verbesserung der Materialeffizienz und Maßhaltigkeit sowie die Reduktion der Werkzeugbeanspruchung erfordern ein grundlegendes Prozessverständnis. Mögliche Einflüsse sind in werkzeug- und bauteilseitige sowie tribologische Größen unterteilbar [79].

##### **Werkzeug**

Die formgebende Matrize bildet nach GEIGER den wichtigsten Bestandteil des Werkzeugsystems beim Vorwärtsfließpressen [124]. Die Querschnittsverringeringung wird durch eine axial durch den Stempel aufgebraachte Druckspannung initiiert. Hierdurch entstehen lokale hohe Kontaktnormalspannungen [100] und es werden tangentielle Zugspannungen im Einlauf- sowie Zahnkopfbereich der Matrize induziert [111]. Eine lokale Überschreitung der Fließgrenze des Matrizenwerkstoffs führt zu einer bereichsweisen Plastifizierung der Werkzeugoberfläche [100]. In Verbindung mit einer dynamischen Wechselbeanspruchung durch aufeinanderfolgende Umformhübe besteht die Gefahr des Risswachstums und Ermüdungsbruchs [125].

Um kritischen Zugspannungen entgegenzuwirken, wird oberhalb eines Innendrucks von  $1.000 \text{ N/mm}^2$  ein Armierungssystem eingesetzt, durch das eine Druckvorspannung erzeugt wird [126]. Dieses ist geeignet, die auftretenden Zugspannungen zu reduzieren, beeinflusst nach PÖHLANDT ET AL.

die elastische Aufweitung der Matrize jedoch kaum [127]. Ein Ansatz zur Verringerung der Matrizenaufweitung besteht im Einsatz von Hartmetallwerkstoffen, die im Vergleich zu Stählen E-Module von 450 bis 600 GPa statt 180 bis 240 GPa aufweisen [128]. Eine um etwa 50 % verbesserte Maßhaltigkeit beim Kaltfließpressen von Zahnrädern mit Hartmetallmatrizen gegenüber Schnellarbeitsstahl wurde von JÜTTE [129] nachgewiesen. Zudem kann wie von KANG ET AL gezeigt eine Optimierung der Geometrie der Fließpressmatrize unter Berücksichtigung der zu erwartenden Auffederung erfolgen [130], wobei hierzu ein hoher numerischer oder experimenteller Aufwand erforderlich ist. Eine Möglichkeit zur Erhöhung der erzielbaren Verzahnungsgenauigkeit um 40 % durch aktive Kompensation der Matrizenaufweitung während der Umformung wurde von BAUMGARTEN [79] vorgestellt. Zu diesem Zweck wird ein ringförmiges Elastomer in die Matrizenwand integriert, das durch die Stempelbewegung axial mit Druck beaufschlagt wird und dessen radiale Aufweitung der Auffederung der Matrize entgegenwirkt [131]. Durch Senkerodieren, das einem industriell üblichem Fertigungsverfahren zur Herstellung geometrisch komplizierter Umformwerkzeuge entspricht [132], sind hohe Genauigkeiten erreichbar, so dass die Abweichungen der Matrize gegenüber anderen Einflüssen vernachlässigbar sind [133]. GROCHE ET AL. zeigten, dass eine hohe Oberflächengüte der Matrize nötig ist, um Reibung zu reduzieren [134].

Die Querschnittsabnahme während der Umformung wird durch den Matrizen Schulterwinkel definiert, wobei durch kleine Winkel ( $60^{\circ}$ - $90^{\circ}$ ) die Formänderung über einen größeren Bereich verteilt und die Werkzeugbeanspruchung reduziert wird [135]. Dagegen wird die Formfüllung durch größere Öffnungswinkel ( $120^{\circ}$ - $140^{\circ}$ ) aufgrund der stärkeren Stoffflussumlenkung und des erhöhten Werkzeugkontakts verbessert [72]. Für die Verzahnungsherstellung durch Vorwärtsfließpressen wurden optimale Schulterwinkel zwischen  $90^{\circ}$  von JEONG ET AL. [13] und  $120^{\circ}$  von KOLL [76] ermittelt.

## **Bauteil**

Die Festlegung der geometrischen Zahnradgrößen wie Modul, Zähnezahl und Schrägungswinkel erfolgt im Rahmen der Vorauslegung des Getriebes auf Grundlage der Anforderungen an die Bewegungsübertragung, die Leistungsdichte und den Bauraum [15]. Die Zahnradparameter beeinflussen die bei der Herstellung durch Kaltfließpressen erzielbaren Bauteileigenschaften unmittelbar.

### Zahnradgeometrie

Bei erhöhtem Modul und somit Zahnradradius kommt es zu einer relativen Vergrößerung des Bauteilmittensbereiches gegenüber der Verzahnung, da die Fläche des Kreisquerschnittes mit steigendem Durchmesser quadratisch zunimmt. Dies bewirkt, wie von KIENER gezeigt, eine relative Abnahme des umgeformten Volumens und - trotz zunehmendem absoluten Kraftbedarf - eine Reduzierung der relativen, auf den Zahnradradius bezogenen Kraft [78]. Zudem wird der Materialfluss in den nicht verfestigten Mittensbereich erhöht, weshalb die Formfüllung und Genauigkeit des Verzahnungsbereichs verringert werden [77]. Bei konstantem Modul und erhöhter Zähnezahl erfolgt ebenfalls eine relative Zunahme des nicht verfestigten Bauteilmittensbereiches [78]. KEPPLER-OTT zeigte, dass ein vergrößerter Schrägungswinkel zu einem asymmetrischen Stofffluss führt, wodurch abweichende Eigenschaften der linken und rechten Flanke [77] sowie eine reduzierte Genauigkeit resultieren. Dies ist auch auf eine erhöhte Prozesskraft und Werkzeugdeformation zurückzuführen [93].

### Halbzeug

Werkstoff [136] und Maßabweichungen [137] der Rohlinge beeinflussen die erzielbare geometrische Genauigkeit der Bauteile sowie die Prozesseigenschaften beim Kaltfließpressen. Es werden deshalb eine geringe Schwankung der mechanischen Eigenschaften [138] sowie eine enge Tolerierung der geometrischen Abweichungen hinsichtlich Maß-, Lage- und Formfehlern [139] gefordert. Weiterhin führen Chargenschwankungen oder wechselnde Werkstoffzustände zu variierenden Fließseigenschaften, wodurch eine Streuung der Prozesskräfte und Werkzeuglebensdauer resultiert [140]. Im industriellen Umfeld erfolgt die Rohlingherstellung durch Abschnitt von Stangenmaterial, wodurch nur begrenzte geometrische Toleranzen erzielbar sind [82].

### Tribologie

Die Komponenten des tribologischen Systems - bestehend aus Werkstück, Schmierstoff und Werkzeug - beeinflussen die Reibung während der Umformung [141], wobei das eingesetzte Schmiersystem maßgeblich ist [123]. Durch dieses soll eine durchgehende Trennung von Werkstück und Werkzeug erfolgen und ein direkter metallischer Kontakt vermieden werden [142]. Insbesondere bei der Umformung von Aluminium tritt ansonsten adhäsiver Verschleiß auf [143]. Beim Kaltfließpressen von Verzahnungen resultiert eine hohe tribologische Beanspruchung aufgrund lokal hoher

Umformgrade und Oberflächenvergrößerungen von 150 % [102] sowie Kontaktnormalspannungen von bis zu 3,500 N/mm<sup>2</sup> [78] auf, infolgedessen die Schmierfilmdicke auf der Werkstückoberfläche verringert wird [72]. Von GROCHE ET AL. wurde ein Einfluss der tribologischen Bedingungen auf die Einglättung und Rauheit fließgepresster Oberflächen nachgewiesen [11]. In Vorarbeiten wurde die Auswirkung verschiedener Schmiersysteme auf die Topografie durch Vorwärtsfließpressen hergestellter Zahnräder bestätigt [102]. Ebenso wurde eine Verbesserung der Formfüllung zu Prozessbeginn durch eine zunehmende Reibung identifiziert, es wurde jedoch kein Einfluss auf Profil- und Flankengenauigkeit oder Verfestigung der Zahnflanke festgestellt [102]. Eine korrekte Auslegung des Schmiersystems ist entscheidend, um einen Kompromiss aus Werkzeugbeanspruchung und Formfüllung zu erreichen sowie Schwankungen der tribologischen Bedingungen zu vermeiden. Vor dem Hintergrund einer einsatzfertigen Verzahnungsherstellung bieten Einschichtschmiersysteme, die es nach GROCHE ET AL. ermöglichen, auf Prozessschritte zur Aufbringung sowie Entfernung der Konversionsschichten nach der Umformung zu verzichten [144], wesentliches Potential.

### **2.3 Zusammenfassende Bewertung und resultierende Forschungslücke**

Trockenlaufende Zahnradgetriebe der Materialpaarung Metall-Kunststoff bieten Potential für Anwendungen geringer und mittlerer Leistung. Der Einsatz von Metallzahnradern ermöglicht es, eine erhöhte Beanspruchbarkeit von Kunststoffgetrieben zu erzielen sowie auf den Einsatz von Schmierstoffen zu verzichten, wodurch Kosten in Herstellung und Betrieb eingespart werden. Für die Anwendung in der Materialpaarung ist die einsatzfertige Herstellung von Metallzahnradern durch Vorwärtsfließpressen vielversprechend. Das Fertigungsverfahren ermöglicht die Herstellung metallischer Gerad- und Schrägverzahnungen in einem reproduzierbaren und wirtschaftlichen Prozess. Herausforderungen sind die, aufgrund des auftretenden Verschleißes, begrenzte Lebensdauer der Getriebepaarung sowie die, gegenüber der konventionellen spanenden Herstellung, limitierte erzielbare Verzahnungsgenauigkeit. Vor diesem Hintergrund bestehen unzureichende Erkenntnisse zum Einfluss der umforminduzierten Eigenschaften der metallischen Verzahnung auf das Verschleißverhalten sowie dem Einsatz von Nichteisen- und Leichtmetallen in der Materialpaarung. Zudem ist ein tiefgehendes Prozessverständnis erforderlich, um die gezielte Beeinflussung der einsatzrelevanten Bauteileigenschaften im Umformprozess zu ermöglichen.

### 2.3.1 Unbekannte Einflussgrößen auf den Verschleiß

Die Einflussgrößen der metallischen Bauteileigenschaften auf das Verschleißverhalten der Materialpaarung sind unzureichend erforscht. Es fehlt ein Verständnis der auftretenden Verschleißmechanismen in Abhängigkeit von Werkstoff und Härte des Metallwerkstoffes sowie der resultierenden Einsatzgrenzen. Für den Einsatz von Aluminium- und Messingwerkstoffen, die Leichtbaupotential sowie Vorteile aufgrund der hohen Korrosionsbeständigkeit bieten, liegen nur vereinzelte Forschungsarbeiten zum Einsatz in der Materialpaarung vor (Tabelle 1). In diesem Zusammenhang erfolgte keine systematische Untersuchung des Einflusses der Werkstoffhärte und keine Analyse der Verschleißmechanismen. Bisherige Untersuchungen sind weitgehend auf den Einsatz vergüteter und gehärteter Stahlritzel mit hoher Oberflächengüte begrenzt. Es ist bekannt, dass es bei unzureichender Härte zur Abrasion der metallischen Oberfläche kommt [39]. Unklar ist jedoch, wie sich dies auf die abrasiven Verschleißmechanismen, die Oberflächentopografie sowie den Verschleiß von Ritzel und Rad auswirkt.

Es bestehen keine Erkenntnisse zum Einsatz fließgepresster Zahnräder und dem Einfluss umforminduzierter Bauteileigenschaften. Dies betrifft die Auswirkungen der Kaltverfestigung sowie der umforminduzierten Oberfläche, da im Umformprozess eine gerichtete Topografie resultiert. Zwar ist der Einfluss der Rautiefe metallischer Oberflächen mit ungerichteter Topografie, die durch spanende Prozesse gefertigt wurden, auf das Auftreten abrasiver und adhäsiver Verschleißmechanismen systematisch erforscht worden [39]. Es erfolgte jedoch keine Berücksichtigung der Vorzugsrichtung der Oberflächenstrukturen, weshalb keine Übertragung der Erkenntnisse auf umforminduzierte Oberflächen möglich ist. Zudem ist auch das Verhalten metallischer Oberflächen mit reduzierter Festigkeit nicht untersucht worden.

Um die Herstellung von Zahnrädern durch Fließpressen zu ermöglichen, ist die Einbringung von Kopf- und Fußradien erforderlich. Diese beeinflussen die Werkzeugbeanspruchung bei der Umformung, die Wirkung auf den Verschleiß ist jedoch nicht bekannt. Vor diesem Hintergrund ist unklar wie sich die lokale Beanspruchung der Zahnradpaarung auf den Verschleiß der Zahnflanke auswirkt, da die Radien die Länge der aktiven Zahnflanke und das Eingriffsverhalten beeinflussen. Bisherige Untersuchungen zum Einfluss der Zahngeometrie auf den Verschleiß fokussierten lediglich auf veränderte Zähnezahlen und Module.

### **2.3.2 Fehlendes Prozessverständnis des Fließpressprozesses**

Zur einsatzfertigen Herstellung metallischer Verzahnungen mit betriebsangepassten Eigenschaften durch Vorwärtsfließpressen besteht ein unzureichendes Prozessverständnis. In der Literatur erfolgte keine Analyse halbzeugseitiger Einflussgrößen auf die einsatzrelevanten Bauteileigenschaften fließgepresster Verzahnungen und die zugrundeliegenden Wirkzusammenhänge. Unbekannt sind die Auswirkungen variierender Fließseigenschaften, insbesondere von hochlegierten Aluminiumwerkstoffen im vorverfestigten Materialzustand, die Potential zum Einsatz in der Materialpaarung Metall-Kunststoff bieten. Forschungsarbeiten beschäftigten sich mit dem Einfluss der Anfangsfließspannung ohne Berücksichtigung des Verfestigungsverhaltens [72]. Zwar wurde bei Umformung von Aluminium eine stark reduzierte Formfüllung festgestellt [91], es wurde jedoch kein Verständnis der zugrundeliegenden Ursachen erarbeitet.

Aufgrund der verringerten Genauigkeitsanforderungen sind in der Materialpaarung höhere Verzahnungsabweichungen zulässig. In der Literatur bestehen keine Erkenntnisse zum Einfluss geometrischer Abweichungen des Halbzeugs auf die Genauigkeit und mechanischen Eigenschaften der fließgepressten Verzahnung. Weiterhin fehlen Methoden zur gezielten Beeinflussung der Bauteileigenschaften, um die einsatzfertige Herstellung von Zahnrädern mit angepasstem Eigenschaftsprofil durch Fließpressen zu ermöglichen. Die aus der Literatur bekannte Anpassung des Matrizeschulterwinkels bewirkt eine global erhöhte Stoffflussumlenkung und somit eine gesteigerte Verfestigung und Formfüllung aber auch Werkzeugbeanspruchung [66]. Angesichts dessen sind Maßnahmen zur lokalen Einstellung der einsatzrelevanten Bauteileigenschaften erforderlich. Zur Generierung des Prozessverständnisses ist der Einsatz eines numerischen Prozessmodells vielversprechend, wobei zur Vorhersage der erzielbaren geometrischen Genauigkeit fließgepresster Bauteile die Berücksichtigung des elastischen Werkzeugverhaltens nötig ist [130].

### 3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Zielsetzung dieser Arbeit ist die Schaffung eines grundlegenden Verständnisses zur Herstellung betriebsangepasster Verzahnungen durch Fließpressen für den Einsatz in der Materialpaarung Metall-Kunststoff. Dies beinhaltet die Ermittlung von Einflussgrößen der metallischen Verzahnung auf das Verschleißverhalten sowie die Identifikation der auftretenden Verschleißmechanismen. Zu untersuchende Einflüsse auf das Verschleißverhalten sind die Zahngeometrie, die Kaltverfestigung und die umforminduzierte Oberflächentopografie. Hierdurch sollen allgemeingültige Erkenntnisse zu den Einsatzgrenzen metallischer Werkstoffe in der Materialpaarung geschaffen werden.

Des Weiteren soll ein Prozessverständnis zum Fließpressen einsatzfertiger Verzahnungen erarbeitet werden. Hierzu sind der Einfluss der Halbzeuggeometrie und der Fließeigenschaften des metallischen Werkstoffs auf die Prozess- und Bauteileigenschaften sowie die zugrundeliegenden Wirkzusammenhänge zu erforschen. Aufbauend darauf sollen Stellhebel zur systematischen Beeinflussung der umforminduzierten Bauteileigenschaften der fließgepressten Verzahnungen entwickelt werden. Es wird die Hypothese aufgestellt, dass durch gezielte Erhöhung der lokalen Kaltverfestigung der Zahnflanke und Beeinflussung der umforminduzierten Oberflächentopografie das Einsatzpotential von Leichtmetallen erweitert, der Verschleiß reduziert und eine erhöhte Lebensdauer der Zahnradgetriebe erzielt werden können. Weiterhin wird die Einsparung einer Wärmebehandlung und spanenden Nachbearbeitung des metallischen Ritzels angestrebt, um die Prozesskette der Verzahnungsherstellung zu verkürzen. Zur Erreichung der Zielsetzung wird die in Bild 2 dargestellte methodische Vorgehensweise angewendet.

Zur Generierung eines grundlegenden Prozessverständnisses ist ein Referenzprozess zum Voll-Vorwärtsfließpressen metallischer Zahnräder aufzubauen und numerisch mittels FE-Software zu modellieren. Um eine ausreichende Prognosegüte für die folgenden Untersuchungen sicherzustellen, soll die Prognosegüte des FE-Modells anhand von experimentellen Umformversuchen überprüft werden. Zur Erreichung des ersten Teilziels, der Ermittlung des Verschleißverhaltens der hergestellten Zahnräder, ist eine Untersuchung des Betriebsverhaltens auf einem zu diesem Zweck konzipierten Getriebeprüfstand geplant. Hierzu ist im Rahmen der Arbeit eine Auswertemethode zur Identifikation der auftretenden Verschleißmechanismen zu erarbeiten und zu qualifizieren.

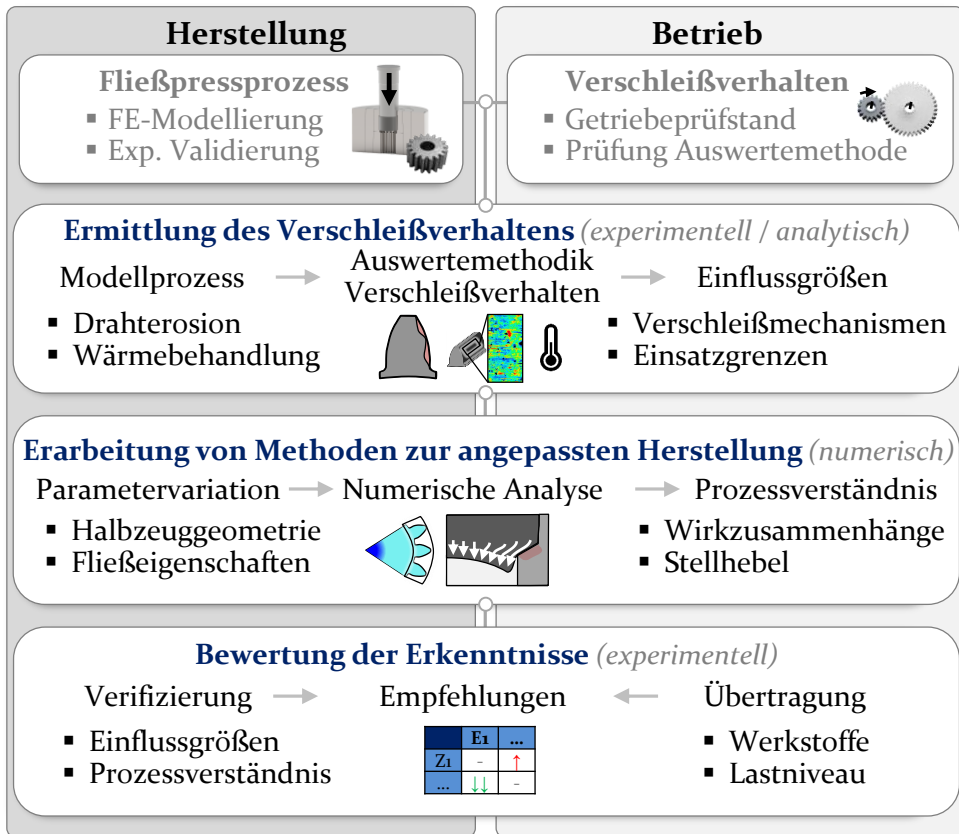


Bild 2: Methodische Vorgehensweise

Um den Einfluss der geometrischen und mechanischen Bauteileigenschaften der metallischen Verzahnung zu untersuchen, ist eine gezielte Eigenschaftsvariation durch Herstellung der Zahngeometrie im Modellprozess mittels Drahterosion und Wärmebehandlung des Werkstoffgefüges vorgesehen. Die auftretenden Verschleißmechanismen sollen durch eine Analyse der verschleißbedingten Veränderung der Zahnkontur, der Flankentopografie sowie der auftretenden Verlustwärme identifiziert werden. Ziel ist es, Einflussgrößen zu ermitteln und mögliche Einsatzgrenzen der metallischen Werkstoffe abzuleiten.

Als weiteres Teilziel sollen Methoden zur betriebsangepassten Herstellung der Verzahnung, durch gezielte Beeinflussung der zuvor identifizierten einsatzrelevanten Bauteileigenschaften, erarbeitet werden. Zu diesem Zweck ist eine Parametervariation der Halbzeuggeometrie sowie der Fließeigenschaften, zur Abbildung unterschiedlicher Metallwerkstoffe und Ausgangszustände, geplant. Mit Hilfe des FE-Modells soll eine numerische

Analyse des Stoffflusses und Werkzeugkontakts durchgeführt werden, wodurch Wirkzusammenhänge abgeleitet werden sollen. Auf Grundlage des erarbeiteten Prozessverständnisses wird darauf abgezielt, Stellhebel zur gezielten Beeinflussung der Prozess- und Bauteileigenschaften zu identifizieren.

Die erarbeiteten Erkenntnisse sollen verifiziert und die Übertragbarkeit überprüft werden. Zu diesem Zweck sind Umformversuche vorgesehen, in denen die numerisch ermittelten Einflussgrößen und Stellhebel im Fließpressprozess experimentell umgesetzt werden, um die erarbeiteten Modellvorstellungen zu plausibilisieren. Zudem soll eine Verbesserung des Verschleißverhaltens der mit angepassten Bauteileigenschaften hergestellten Zahnräder überprüft werden, wobei die Verifizierung des Auftretens der identifizierten Verschleißmechanismen angestrebt wird. Um die Übertragbarkeit auf Zahnradpaarungen mit anderen Polymerwerkstoffen und unter gesteigerten Lastniveaus sicherzustellen, ist der Einsatz eines glasfaserverstärkten Polyamids bei um 100 % erhöhter Drehzahl sowie Drehmoment geplant.

Abschließend soll ein grundlegendes Verständnis über Einflussgrößen und werkzeugseitige Stellhebel bei der Verzahnungsherstellung durch Vorwärtsfließpressen sowie zum Einfluss der Eigenschaften der metallischen Verzahnung auf die auftretenden Verschleißmechanismen bereitgestellt werden. Eine weitere Zielsetzung ist die Ableitung anwendungsgerechter Empfehlungen zur Herstellung betriebsangepasster metallischer Zahnräder für die Materialpaarung Metall-Kunststoff durch Kaltfließpressen. Durch diese sollen die Materialausnutzung im Fließpressprozess gesteigert und die Prozesskette der Verzahnungsherstellung gegenüber der spanenden Fertigung verkürzt werden. Durch eine Verbesserung des Verschleißverhaltens wird zudem auf eine Steigerung der Lebensdauer von Metall-Kunststoffgetrieben abgezielt. Hierdurch soll ein Beitrag zur Einsparung von Kosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen über den gesamten Produktlebenszyklus geleistet werden.



## 4 Zahnradpaarung, Herstellung, Werkstoffe und Untersuchungsmethoden

In diesem Kapitel wird auf die untersuchte Zahnradpaarung, die eingesetzten Werkstoffe sowie die Methoden zur Erfassung der Bauteileigenschaften und Charakterisierung des Verschleißverhaltens eingegangen. Zudem wird der Aufbau des Fließpressprozesses zur Zahnradherstellung sowie dessen numerische Modellierung vorgestellt.

### 4.1 Zahngeometrie und Lastfall

Die Untersuchungen werden an einer einstufigen Getriebestufe, bestehend aus einem Metallritzel und einem Polymerrad, durchgeführt. Nachfolgend werden die Geometrie (Bild 3) und der Lastfall der Paarung vorgestellt.

	Ritzel	Rad	
<b>Zahngeometrie</b>	Modul 1 mm		
Zähnezahl	17	39	
Profilverschiebung	0,205	-0,314	
Kopfkreis-Ø	19,409 mm	40,372 mm	
Zahnradbreite	8,0 mm	6,0 mm	
<b>Werkstoff</b>	Metall	Polymer	

Bild 3: Geometrie der untersuchten Zahnradpaarung

Es wird eine Evolventenverzahnung [145] eingesetzt, da diese unempfindlich gegenüber Achsabstandsänderungen aufgrund fertigungsbedingter Abweichungen oder Verschleiß ist und die größte industrielle Anwendungsrelevanz aufweist [146]. Ritzel und Rad werden mit 17 und 39 Zähnen (Übersetzung  $i=2,3$ ) bei einem Modul  $m$  von 1 mm ausgelegt, was nach der VDI-Richtlinie 2736 einer typischen Größe für Stellantriebe entspricht [21]. Um einen Hinterschnitt an der Zahnkontur zu vermeiden und die Herstellung durch Fließpressen zu ermöglichen, wurde das Ritzel mit einer positiven Profilverschiebung sowie mit Kopf- und Fußradien von 0,3 mm versehen, die in Voruntersuchungen [115] festgelegt wurden. Das Ritzel wird mit einem Drehmoment von 1 Nm beaufschlagt. Die Drehzahlen von Ritzel und Rad betragen  $2.294 \text{ min}^{-1}$  und  $1.000 \text{ min}^{-1}$ . Dies entspricht einer Leistung nach (6) [18] von 240 W, wodurch ein Getriebe im mittleren Leistungsbereich abgebildet wird [147].

$$P = \frac{W}{\Delta t} = \frac{F * 2\pi r}{T} = 2\pi * n * M \quad (6)$$

Zur Überprüfung der Übertragbarkeit der erarbeiteten Erkenntnisse erfolgt zudem die Untersuchung eines erhöhten Lastfalls unter Einsatz eines faserverstärkten Polymerwerkstoffs. Aufgrund der gesteigerten Tragfähigkeit des Kunststoffrads ist die Paarung für hohe Drehmomente geeignet [148]. Das Ritzel wird bei einer Drehzahl von  $4.588 \text{ min}^{-1}$  (Rad  $2.000 \text{ min}^{-1}$ ) mit einem Drehmoment von 2 Nm belastet, was in einer Leistung von 961 W (6) resultiert und Anwendungen höherer Leistung im Bereich der Automatisierungstechnik entspricht [147].

## 4.2 Verzahnungsherstellung

Im Folgenden erfolgt eine Beschreibung der eingesetzten Verfahren zur Herstellung der Kunststoffräder und Metallritzel. Der Fokus liegt auf dem Fließpressprozess zur Fertigung der metallischen Ritzel, der sowohl numerisch als auch experimentell untersucht wird.

### 4.2.1 Spritzgießen der Kunststoffräder

Die Kunststoffräder wurden im Spritzgussverfahren am Lehrstuhl für Kunststofftechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg hergestellt und für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt. Die Fertigung erfolgt auf einer Spritzgussmaschine vom Typ Arburg 370U-700-30-30 der Firma Arburg GmbH & Co. KG.

### 4.2.2 Drahterodieren der Metallritzel

Für die gezielte Untersuchung des Einflusses von Werkstoff- und Werkstoffzustand sowie der Zahngeometrie werden metallische Ritzel durch Drahterodieren mittels dem Funkenerosionsverfahren (EDM) hergestellt. Durch den Einsatz des Modellprozesses wird sichergestellt, dass Zahnräder aus verschiedenen Werkstoffen mit reproduzierbaren geometrischen und mechanischen Eigenschaften gefertigt werden. Zudem wird eine gezielte Variation der Zahngeometrie mit hoher Genauigkeit ermöglicht, ohne dabei die mechanischen Bauteileigenschaften zu beeinflussen. Dies erlaubt eine systematische Untersuchung der Einflussgrößen. Die Oberfläche der Ritzel wird durch Mikrostrahlen mit einem abrasiven Strahlgut aus Aluminiumoxyd mit einer Korngröße von  $10 \mu\text{m}$  nachbearbeitet, um unabhängig vom Herstellprozess zu Beginn der Verschleißversuche eine homogene Topografie einzustellen.

### 4.2.3 Fließpressen der Metallritzel

Die umformtechnische Verzahnungsherstellung erfolgt durch einen Voll-Vorwärtsfließpressprozess. Zur Untersuchung von Einflussgrößen auf das Prozessergebnis und zur Erarbeitung von Methoden zur betriebsoptimierten Herstellung wird ein virtuelles Prozessmodell eingesetzt. Im Folgenden wird auf das eingesetzte Schmieresystem, den Prozessaufbau, sowie die numerische Modellierung eingegangen.

#### Schmierstoffsysteme

Es werden Schmierstoffsysteme ohne Konversionsschicht eingesetzt, um einen Einfluss der aufgetragenen Schicht auf den Verschleiß der Zahnradpaarung zu vermeiden. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass trotz hoher tribologischer Beanspruchung neuartige, leistungsfähige Einschichtschmieresysteme für die Herstellung von Verzahnungen geeignet sind [102]. Zur Charakterisierung der tribologischen Bedingungen wurden die Reibfaktoren im Double-Cup-Extrusion (DCE)-Test quantifiziert, der einen etablierten Laborversuch [149] zur Abbildung anspruchsvoller Massivumformprozesse mit hohen Kontaktspannungen und Oberflächenvergrößerungen darstellt [150]. Werkzeugwerkstoff, Beschichtung und die Nachbehandlung durch manuelle Politur der DCE-Matrize entsprechen den Matrizen zur Zahnradherstellung, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Die Reibfaktoren wurden durch numerische Identifikation ausgehend von den experimentell ermittelten Napfhöhenverhältnissen mit Hilfe der in Industrie und Forschung etablierten Finite-Elemente (FE) Simulationssoftware *simufact.forming 16.0* der Firma *Simufact Engineering GmbH* bestimmt. Die Prognosegüte der identifizierten Reibfaktoren wurde durch einen Abgleich der Prozesskraft und Bauteilgeometrie aus Simulation und Experiment für jeden Werkstoff und je ein Schmieresystem validiert [151].

Anhand der im DCE-Test ermittelten Reibfaktoren werden geeignete Schmieresysteme ausgewählt, um bei Umformung der drei Zahnradwerkstoffe vergleichbare tribologische Bedingungen zu erzielen. Eingesetzt werden wässrige Spezialpolymere der Firma *ZWEZ-CHEMIE GmbH*, bei denen es sich um synthetisch hergestellte Schichten aus langkettigen Polymerverbindungen mit hoher Leistungsfähigkeit handelt [144]. Die Reibfaktoren betragen  $0,060 \pm 0,013$  für 16MnCr5+A (Schmierstoff ZWEZ PD470),  $0,062 \pm 0,018$  für CuZn37+C (ZWEZ PD473) und  $0,064 \pm 0,012$  für AlMgSi T6 (ZWEZ PD 377). Zur Entfernung der Schmierstoffreste nach der Umformung wird ein alkalischer Reiniger verwendet.

## Prozessaufbau

Nachfolgend wird auf den Prozessaufbau (Bild 4) und die Auslegung des Werkzeugsystems eingegangen. Die Gestaltung der Fließpressmatrize basiert auf numerischen Voruntersuchungen [115] sowie auf Literaturempfehlungen [125].

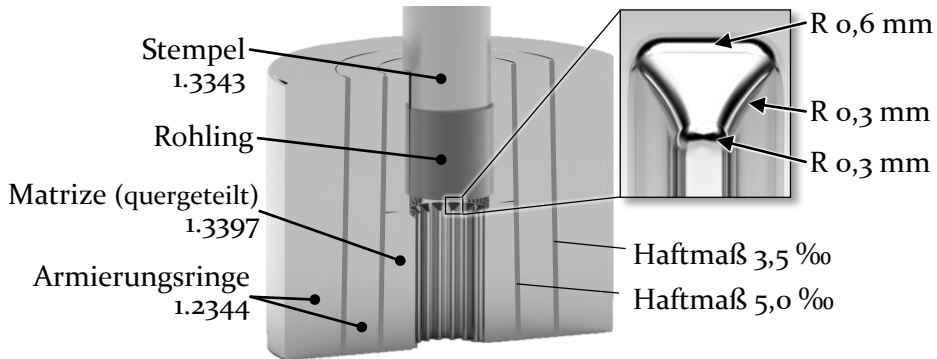


Bild 4: Aufbau des Voll-Vorwärtsfließpressprozesses zur Zahnradherstellung

Zur Vermeidung von Spannungsspitzen in der Umformzone wird die Matrize 0,5 mm oberhalb der Fließpressschulter quergeteilt. Der Außendurchmesser wird nach der VDI-Richtlinie 3176 anhand des Kopfkreisdurchmessers des Zahnrads gewählt [126]. Aufgrund des zu erwartenden Innendrucks von mehr als 2.000 N/mm<sup>2</sup> wird die Matrize zweifach armiert [126]. Die verzahnte Kavität wird durch Senkerodieren hergestellt [132]. Zur Erreichung einer hohen Oberflächengüte von  $R_z = 1,46 \pm 0,07 \mu\text{m}$  wurde die Matrizenbohrung durch Extruderhonen und manuelles Polieren nachbearbeitet. Hierdurch wird eine Kerbwirkung an der Kontaktfläche zwischen Werkstück und Werkzeug vermieden [152]. Zur Minimierung der Adhäsion von Messing oder Aluminium wird die Matrize im PVD-Verfahren mit CrCN beschichtet [125].

Zum Fließpressen der Zahnräder wird die elektromechanische Universalprüfmaschine vom Typ Schenk-Trebel RM400 der Firma Schenck Corporation eingesetzt, die eine maximale Stempelkraft von 400 kN aufweist. Die Umformung wird weggeregelt und mit einer Positioniergenauigkeit von  $\pm 0,01 \text{ mm}$  nach DIN EN ISO 75000 [153] durchgeführt.

## Numerische Modellierung

Die Finite-Elemente-Methode (FE-Methode) ist in der Kaltmassivumformung zur Prozessanalyse etabliert [154]. Analog zur Abbildung der DCE-Tests wird die Simulationssoftware simufact.forming 16.0 eingesetzt. Die

numerische Modellierung erfolgt durch Diskretisierung des Prozessmodells und der vorliegenden Randbedingungen, der Lösung der Gleichungen sowie der grafischen und numerischen Auswertung der Ergebnisse [155]. Das FE-Modell wird aus der Matrize, den Armierungsringen, dem Stempel und dem Werkstück aufgebaut. Es wird eine gekoppelte Analyse des Stoffflusses mit elastischem Werkzeugverhalten unter Einbeziehung der durch das Armierungssystem aufgebracht radialen Vorspannung durchgeführt. Hierdurch wird der Einfluss der elastischen Aufweitung der Matrize auf die Bauteilformung berücksichtigt und eine erhöhte Prognosegüte der Verzahnungsgenauigkeit ermöglicht. In Voruntersuchungen, innerhalb derer Stahlzahnäder durch Auspressen der Matrize aus der Armierung kraftfrei entnommen wurden, wurde kein Einfluss des Auswerfervorgangs auf die Bauteileigenschaften der Geradverzahnung festgestellt. Vor diesem Hintergrund wird auf die Modellierung des Auswerfervorgangs verzichtet.

Um die Anzahl der finiten Elemente und die Berechnungszeit zu reduzieren, wird ein segmentiertes Modell eingesetzt. Ein Segmentwinkel von  $62,5^\circ$  (drei Zähne) ist erforderlich, um Probleme bei der Vernetzung durch einen zu spitzen Winkel in der Werkstückmitte zu vermeiden. Das Werkstück wird mit Hexaedern vernetzt, um die dreidimensionale Verformung abzubilden [155]. Die Werkzeuge werden mit Tetraedern diskretisiert, was die Rechenzeit im Vergleich zu Hexaedern reduziert und bei der lediglich geringen elastischen Verformung hinreichend exakte Ergebnisse liefert [155]. Die erforderliche Auflösung des FE-Netzes für eine ausreichend genaue Reproduktion der Verzahnungsgenauigkeit entsprechend der ISO 1328 [19] wurde in Voruntersuchungen ermittelt [151]. Der Randbereich des Werkstücks, in dem das Zahnprofil ausgeformt wird, wird mit einer maximalen Kantenlänge von  $100\ \mu\text{m}$  vernetzt. Im inneren Bereich wird die Verzahnung vergrößert, um den Berechnungsaufwand zu reduzieren. Entsprechend werden der verzahnte Bereich der Matrize fein ( $100\ \mu\text{m}$ ) und der Randbereich grob ( $1,50\ \text{mm}$ ) vernetzt. Insgesamt wird die Matrize durch 211.686 und das Werkstück durch 191.021 Elemente diskretisiert. Die Simulation wird in 1.000 inkrementelle Schritte unterteilt, wodurch eine maximale Elementdehnung von 40 % nicht überschritten wird. Nach Berechnung des FE-Modells werden die Bauteilgeometrie und die erforderliche Umformkraft ausgewertet. Zudem werden der Stofffluss, die Verfestigung und der Werkzeugkontakt analysiert, wodurch die Erarbeitung eines grundlegenden Prozessverständnisses ermöglicht wird.

## Festlegung der Rohlingshöhe

Um die geometrische Vergleichbarkeit mit konventionell hergestellten Ritzeln sicherzustellen, werden die fließgepressten Zahnräder spanend nachbearbeitet. Um zu gewährleisten, dass nach spanender Nachbearbeitung des Rohlings eine nutzbare Zahnradbreite von 8 mm für die Verschleißversuche vorhanden ist, wird ein Aufmaß vorgesehen. Die resultierenden Abmessungen des Rohlings, des umgeformten Werkstückes, sowie die Nachbearbeitung sind in Bild 5 dargestellt.

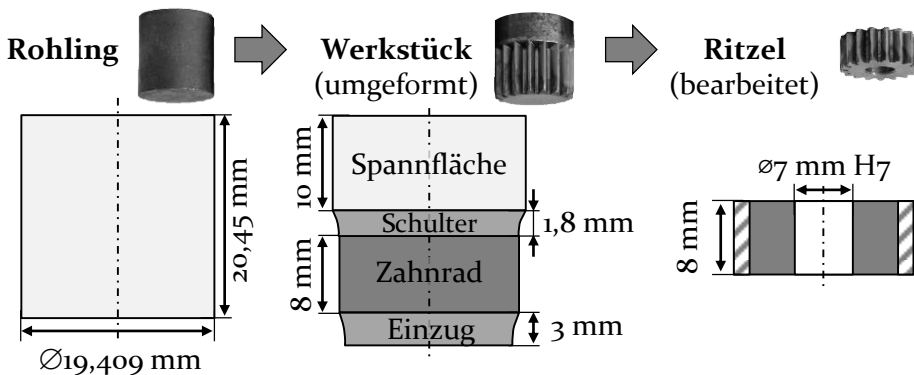


Bild 5: Abmessungen von Rohling, Werkstück und bearbeitetem Ritzel

Der Durchmesser des Rohlings entspricht dem Kopfkreisdurchmesser der Verzahnung. Numerische Voruntersuchungen zeigen die Ausbildung eines prozessbedingten Einzugsbereiches von  $3 \text{ mm}$  im Referenzprozess [151]. Zudem verbleibt oberhalb des Verzahnungsbereichs ein Abdruck der Fließpressschulter mit einer Höhe von  $1,8 \text{ mm}$ , woraus sich eine gesamte umgeformte Höhe von etwa  $12,8 \text{ mm}$  ergibt. Um eine problemlose spanende Nachbearbeitung des Werkstückes im Labormaßstab sicherzustellen, wird eine Spannfläche von  $10 \text{ mm}$  vorgesehen. Daraus ergibt sich die erforderliche Rohlingshöhe von  $20,45 \text{ mm}$  aufgrund der Volumenkonstanz während der Umformung. Nach der Umformung werden die Bereiche mit unzureichender Formfüllung durch spanende Bearbeitung entfernt und eine Befestigungsbohrung eingebracht.

## 4.3 Werkstoffe

Im Folgenden werden die untersuchten Zahnrad- und Werkzeugwerkstoffe beschrieben. Für die numerische Modellierung des Fließpressprozesses ist die Berücksichtigung des elastischen und plastischen Materialverhaltens erforderlich, das sich auf die Auswahl geeigneter Werkzeugstähle auswirkt.

### 4.3.1 Metallritzel

Um den Einfluss verschiedener metallischer Werkstoffe auf das Verschleißverhalten der Materialpaarung zu ermitteln und die Übertragbarkeit der erarbeiteten Erkenntnisse sicherzustellen, wird ein breites Werkstoffspektrum untersucht. Neben Stahl- bieten sowohl Messing- als auch Aluminiumlegierungen aufgrund der kubisch-flächenzentrierten Gitterstruktur eine sehr gute Kaltumformbarkeit [156]. Der niedrig legierte Einsatzstahl 16MnCr5 (1.7131) ist ein häufig eingesetzter Zahnradwerkstoff für mittlere Leistungsbereiche [17] und kann für höhere Anforderungen einsatzgehärtet werden. Zur Abbildung geringerer Festigkeiten wird der unlegierte Einsatzstahl C15 (1.0401) untersucht.

Messing ist das bedeutendste Nichteisenmetall zur Zahnradherstellung, da es eine gute Verschleißfestigkeit und sehr hohe Korrosionsbeständigkeit aufweist [17]. Die Messinglegierung CuZn37 (2.0321) mit einem Zinkgehalt von 37 % ist aufgrund ihrer homogenen, einphasigen Gefügestruktur sehr gut kaltumformbar und weist im Vergleich zu Stahl und Aluminium ein mittleres Festigkeitsniveau auf. Eine Steigerung der Festigkeit kann nur durch Kaltverfestigung erreicht werden [157].

Hochfeste Aluminiumlegierungen bieten aufgrund ihrer hohen Festigkeit bei geringer Dichte Leichtbaupotential. Die aushärtbare 6000er Aluminiumlegierung AlMgSi1 (3.2315) bietet sowohl eine hohe Festigkeit als auch eine gute Kaltumformbarkeit [17]. Das Verhalten von Aluminiumwerkstoffen mit geringer Festigkeit wird durch den Einsatz von Reinaluminium Al99,5 abgebildet. Die chemische Zusammensetzung der Werkstoffe ist in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung der Zahnradwerkstoffe 16MnCr5 [158], C15 [159], CuZn37 [160] Al99,5 [161] und AlMgSi1 [162]

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	S [%]	P [%]	
C15	0,12 - 0,18	0,15 - 0,40	0,30 - 0,60	≤ 0,40	≤ 0,04	≤ 0,03	
16MnCr5	0,14 - 0,19	0,15 - 0,40	1,00 - 1,30	0,80 - 1,10	≤ 0,04	≤ 0,03	
	Cu [%]	Zn [%]	Ni [%]	Fe [%]	Pb [%]	Sn [%]	Al [%]
CuZn37	62,0-64,0	Rest	≤ 0,30	≤ 0,10	≤ 0,10	≤ 0,10	≤ 0,05
	Mg [%]	Si [%]	Mn [%]	Fe [%]	Cu [%]	Zn [%]	Ti [%]
Al99,5	≤ 0,05	≤ 0,25	≤ 0,05	≤ 0,40	≤ 0,05	≤ 0,07	≤ 0,05
AlMgSi1	0,60-1,20	0,70-1,30	0,40-1,00	≤ 0,50	≤ 0,10	≤ 0,20	≤ 0,10

CuZn<sub>37</sub> weist ein einheitliches Gefüge bestehend aus Mischkristallen ( $\alpha$ -Messing) auf. Im festen Zustand wird Zink ohne Veränderung der kfz-Gitterstruktur in Kupfer gelöst [163].

Durch den Zusatz der Elemente Magnesium (Mg), Silizium (Si) und Mangan (Mn) bei der Aluminiumlegierung AlMgSi<sub>11</sub> erfolgt eine gezielte Verbesserung des Eigenschaftsprofils gegenüber Reinaluminium. Die Legierung von Magnesium bewirkt durch den Einbau von Mg-Atomen in das Kristallgitter eine Mischkristallverfestigung [164]. Zudem werden in Verbindung mit Silizium Ausscheidungen gebildet, weshalb durch Ausscheidungshärten eine deutlich erhöhte Festigkeit erreichbar ist [164]. Mangan führt zu einer Verbesserung der Umformbarkeit sowie einer erhöhten Korrosionsbeständigkeit [165]. Aufgrund der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung resultieren unterschiedliche physikalische Eigenschaften der Werkstoffe (Tabelle 3).

Tabelle 3: Physikalische Eigenschaften der Zahnradwerkstoffe 16MnCr<sub>5</sub> [158], C<sub>15</sub> [159], CuZn<sub>37</sub> [160] Al<sub>99,5</sub> [161] und AlMgSi<sub>11</sub> [162]

	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Spezifische Wärmekapazität [J/(kg×K)]	Thermische Leitfähigkeit [W/(mK)]
C <sub>15</sub>	7,8	460	52
16MnCr <sub>5</sub>	7,8	431	44
CuZn <sub>37</sub>	8,4	404	120
Al <sub>99,5</sub>	2,7	901	215
AlMgSi <sub>11</sub>	2,7	896	195

Im Vergleich zu Stahl und Messing weisen Aluminiumwerkstoffe eine wesentlich höhere Wärmeleitfähigkeit auf. Dies ist im Hinblick auf die Ableitung der in der Paarung erzeugten Verlustwärme von Bedeutung, da die mechanischen Eigenschaften wie E-Modul und Festigkeit von Polymeren mit steigender Temperatur stark abnehmen [8]. Zudem ist die Dichte von Aluminium gegenüber Stahl 66 % geringer, woraus ein Leichtbaupotential folgt.

Um den Einfluss von Werkstoff und Härte auf den Verschleiß zu ermitteln, werden Metallritzel durch Drahterosion hergestellt, und die Werkstoffzustände durch Wärmebehandlung variiert. Die resultierenden Werkstoffgefüge und Zahnflankenhärten zeigt Bild 6. Durch die Wärmebehandlung werden symmetrische Eigenschaften des Zahnprofils erzielt, weshalb das Gefüge und die Härteverteilung nur für eine Zahnhälfte dargestellt werden.

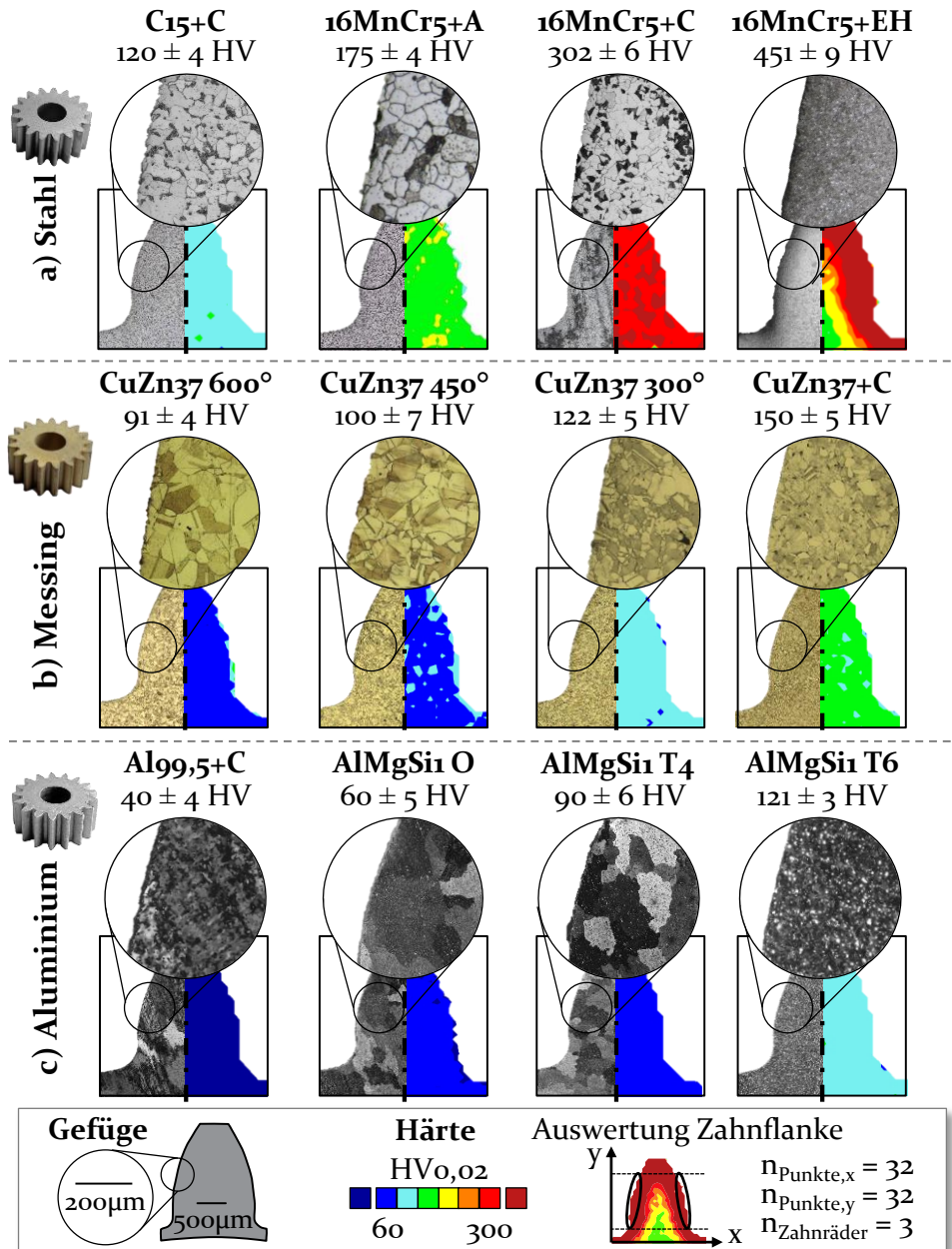


Bild 6: Variation der Gefügestände und Zahnflankenhärte

Die maximale Härte der Stahlzahnäder wird durch Einsatzhärten (+EH) erreicht (Bild 6 a). Die Härtesteigerung resultiert durch Martensitbildung infolge einer Anreicherung des Randbereichs mit Kohlenstoff und anschließendem Abschrecken, wobei sich durch die Diffusion des Kohlenstoffs in

die Bauteilmitte ein Härteverlauf mit hartem Rand und weichem Kern ergibt [166]. Zudem werden 16MnCr5 im kaltgezogenen Lieferzustand (+C) und im weichgeglühten (+A) Zustand sowie C15 im Lieferzustand (+C) untersucht.

Beim Messingwerkstoff CuZn37 (Bild 6 b) ist eine Festigkeitssteigerung nur durch Kaltverfestigung möglich [157], weshalb im Rahmen der Untersuchungen die maximale Härte durch den Einsatz von kaltgewalztem Halbzeug im Lieferzustand (+C) abgebildet wird. Reduzierte Festigkeiten werden durch Entspannungsglügen bei 300°C, sowie Rekristallisationsglügen bei 450°C und 600°C eingestellt. Mit steigender Temperatur nimmt die Korngröße zu und die Festigkeit ab [163]. Bei Aluminium (Bild 6 c) wird die maximale Festigkeit durch Lösungsglügen und Kalt- (T4) sowie Warmauslagern (T6) infolge von Ausscheidungshärtung erreicht [164]. Eine weitere Steigerung der Festigkeit von Messing und Aluminium ist nur durch Kaltverfestigung möglich. Dagegen werden geringere Festigkeiten durch Weichglügen (O) eingestellt, daraus resultiert ein grobkörniges, gleichmäßiges Gefüge.

Zum Fließpressen der Verzahnung wird aus jeder Werkstoffklasse der zur Kaltumformung geeignete Materialzustand mit der höchsten Festigkeit ausgewählt, der durch numerische Voruntersuchungen anhand des Auftretens kritischer Werkzeugbeanspruchungen identifiziert wurde. Das plastische Materialverhalten wurde in der numerischen Modellierung durch Druckfließkurven (Bild 7) berücksichtigt.

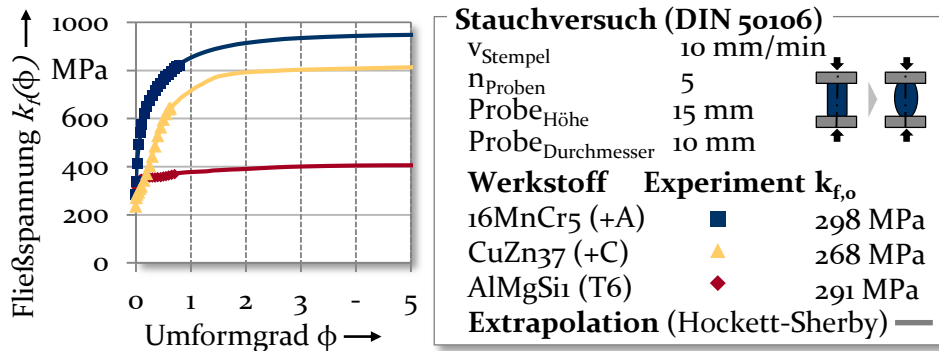


Bild 7: Fließkurven der zum Fließpressen eingesetzten Zahnradwerkstoffe

Die Fließkurven wurden im Stauchversuch nach DIN 50106 [167] bis zu einem Umformgrad von  $\phi = 0,8$  ermittelt. Um höhere Umformgrade abzubilden, wie sie beim Zahnradfließpressen auftreten, wurden die experimentell ermittelten Fließkurven extrapoliert. Für die Extrapolation

wurde der Ansatz nach Hockett-Sherby [168] genutzt, der für alle Werkstoffe die beste Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Fließkurven liefert.

Die extrapolierten Kurven werden in der FE-Simulation hinterlegt [169] und das Materialverhalten aufgrund der Halbzeuggeometrie als ideal isotrop angenommen [170]. Trotz vergleichbarer Anfangsfließspannungen weisen die Zahnradwerkstoffe in dem für die Zahnradumformung relevanten Bereich ( $\phi = 0,5$  bis 4) sehr unterschiedliche Fließspannungsniveaus auf. Aufgrund des bereits vorverfestigten Materialzustands des Aluminiumwerkstoffs ist das verbleibende Verfestigungspotential wesentlich geringer, was anhand der geringen Sättigungsfliessspannung erkennbar ist. Die Sättigungsfliessspannungen  $k_{f,s}$  betragen  $944,3 \pm 7,2$  MPa für 16MnCr5+A,  $815,9 \pm 5,4$  MPa für CuZn37 und  $405,3 \pm 4,0$  MPa für AlMgSi1 T6. Zudem bewirkt die Vorverfestigung von AlMgSi1 T6 eine erhöhte Verfestigungsneigung, weshalb die Sättigungsfliessspannung früher erreicht wird. Die Verfestigungsexponenten liegen bei  $n = 1,88$  (16MnCr5+A),  $n = 2,35$  (CuZn37) und  $n = 3,96$  (AlMgSi1 T6).

#### 4.3.2 Kunststoffräder

Als Werkstoff für die Kunststoffräder wird Polyamid 66 (PA66) [171] gewählt, das einen industriell üblichen Zahnradwerkstoff darstellt, der sich durch geringe Reibung und Verschleiß im Betrieb auszeichnet [7]. Bei Polyamiden handelt es sich um lineare Polymere, die wiederholende Amidgruppen entlang der Hauptkette aufweisen [172]. PA66, das auch als PA6.6 oder Nylon 66 bezeichnet wird, besteht aus zwei Monomeren, wobei jedes jeweils sechs Kohlenstoffatome enthält [172]. Die chemische Struktur lautet  $C_{12}H_{22}N_2O_2$ . Das teilkristalline PA66 bietet eine hohe Steifigkeit, Härte, Abriebfestigkeit sowie eine sehr gute Verschleißfestigkeit, weshalb es die größte Bedeutung der Polyamide als Konstruktionswerkstoff bei hoher mechanischer Beanspruchung hat [172].

Neben dem unverstärkten Zustand (PA66) wird zur Prüfung der Übertragbarkeit der Erkenntnisse auch das glasfaserverstärkte Polyamid 66-GF30 des Typs Ultramid® A3WG6 mit 30 % Glasfasern eingesetzt. PA66-GF30 weist gegenüber PA66 eine gesteigerte Festigkeit sowie Temperaturbeständigkeit auf, wodurch die Tragfähigkeit unter statischer Last als auch bei erhöhten Temperaturen verbessert wird [7].

### 4.3.3 Umformwerkzeuge

Hartmetalle stellen aufgrund der hohen Härte und daraus resultierenden Verschleißbeständigkeit einen industriell üblichen Matrizenwerkstoff dar [125]. Für die Fließpressmatrize wird die Stahlsorte ASP<sub>2012</sub> (1.3397) eingesetzt, die bei hoher Härte eine ausreichende Zähigkeit aufweist [173]. Um das Auftreten versagenskritischer Zugspannungen zu vermeiden, wird die Matrize armiert [126]. Da die Armierung einer Zugbeanspruchung unterliegt, ist eine hohe Zähigkeit und Wechselfestigkeit des Armierungswerkstoffs erforderlich, weshalb der Warmarbeitsstahl X<sub>40</sub>CrMoV<sub>5-1</sub> (1.2344) gewählt wird.

Neben der Matrize ist der Stempel das am höchsten beanspruchte Werkzeugteil und unterliegt einer kombinierten Beanspruchung aus Druck und Biegung [125]. Abgesehen von der korrekten Auslegung gegen Knicken stellt eine ausreichende Druckfestigkeit die wesentliche Anforderung dar, um ein Überschreiten der Druckfließgrenze des Werkstoffs durch die bezogene Stempelkraft zu vermeiden [152]. Als Stempelwerkstoff wird der Schnellarbeitsstahl HSS (1.3343) mit einer hohen Zähigkeit und Druckfestigkeit eingesetzt. Die Richtwerte der chemischen Zusammensetzungen der verschiedenen Werkzeugwerkstoffe sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung der Werkzeugwerkstoffe ASP<sub>2012</sub> (1.3397), X<sub>40</sub>CrMoV<sub>51</sub> (1.2344) und HSS (1.3343)

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]	W [%]	V [%]
ASP 2012 (1.3397)	0,60	1,00	0,30	4,00	2,00	2,10	1,50
X <sub>40</sub> CrMoV <sub>5-1</sub> (1.2344)	0,40	1,00	0,40	5,30	1,30	-	1,00
HS6-5-2C (1.3343)	0,90	0,30	0,30	4,00	5,00	6,20	1,90

Der pulvermetallurgische Schnellarbeitsstahl ASP<sub>2012</sub> (1.3397) hat gegenüber den Warmarbeitsstählen höhere Legierungsbestandteile von Kohlenstoff (C), Molybdän (Mo) und Vanadium (V), woraus eine hohe Härte resultiert. Beim Warmarbeitsstahl X<sub>40</sub>CrMoV<sub>5-1</sub> (1.2344) wird durch vergrößerte Anteile von Silizium (Si), Mangan (Mn) und Chrom (Cr) dagegen eine vergleichsweise höhere Zähigkeit erreicht [174]. Der Schnellarbeitsstahl HS6-5-2C (1.3343) weist hohe Anteile an Kohlenstoff (C), Molybdän (Mo), Wolfram (W) und Vanadium (V) auf, woraus sich ebenfalls eine hohe Härte ergibt [175]. Schnellarbeitsstähle erreichen jedoch nicht die Härte und Verschleißfestigkeit von Hartmetallen [176].

Um die numerische Analyse der Werkzeugbeanspruchung und resultierenden Auffederung während der Verzahnungsherstellung zu ermöglichen, wird das elastische Verhalten der Werkzeugwerkstoffe im FE-Modell hinterlegt. Die mechanischen Eigenschaften zeigt Tabelle 5.

Tabelle 5: Mechanische Eigenschaften der Werkzeugwerkstoffe ASP2012 (1.3397) [173], X40CrMoV5-1 (1.2344) [174] und HS6-5-2C (1.3343) [175]

	E-Modul [kN/mm <sup>2</sup> ]	Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Poissonzahl [-]	Härte [HRC]
ASP 2012 (1.3397)	220	7,80	0,3	57 ± 2,0
X40CrMoV5-1 (1.2344)	210	7,74	0,3	48 ± 2,0
HS6-5-2C (1.3343)	224	8,12	0,3	62 ± 2,0

Der Matrizenwerkstoff ASP2012 (1.3397) hat einen E-Modul von 220 kN/mm<sup>2</sup> gegenüber 210 kN/mm<sup>2</sup> des Warmarbeitsstahls X40CrMoV5-1 (1.2343), der für die Armierung eingesetzt wird. Der Stempelwerkstoff HS6-5-2C (1.3343) weist einen E-Modul von 224 kN/mm<sup>2</sup> auf. Die Einsatzhärten von Matrize (1.3397) und Armierung (1.2344) betragen 57,0 ± 2,0 HRC sowie 48,0 ± 2,0 HRC. Die Härte des Stempels (1.3343) liegt bei 62,0 ± 2,0 HRC.

## 4.4 Verschleißprüfung

Im Folgenden wird die Prüfmethodik zur Untersuchung des Verschleißverhaltens der Materialpaarung beschrieben. Zur Abbildung eines anwendungsnahen Lastfalls wird die Zahnradpaarung auf einem Getriebeprüfstand untersucht. Zudem werden Stift-Scheibe-Versuche als Modellversuch eingesetzt, da die Geometrie der Prüfscheiben eine gezielte Nachbearbeitung der Oberfläche ermöglicht, wodurch die Ermittlung des Einflusses der Topografie des metallischen Partners innerhalb der Materialpaarung ermöglicht wird.

### 4.4.1 Getriebeprüfung

Das Verschleißverhalten wird auf einem zu diesem Zweck konzipierten Getriebeprüfstand untersucht, der nach der VDI-Richtlinie 2736 [177] gestaltet ist. Bild 8 zeigt den schematischen Aufbau.

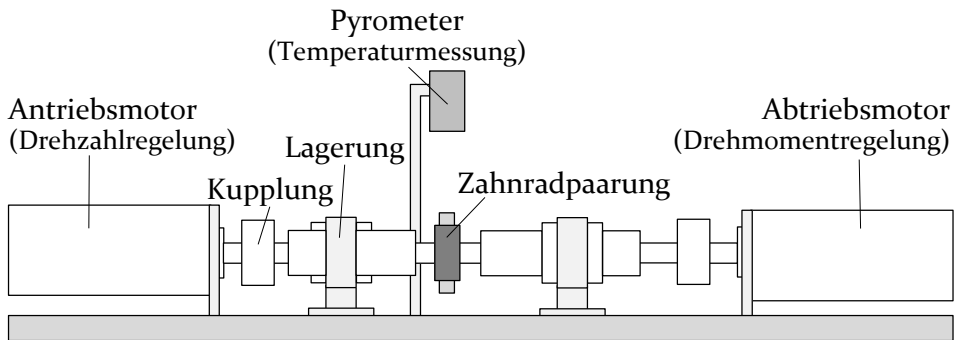


Bild 8: Schematischer Aufbau des Getriebeprüfstands

Die zu prüfende Zahnradpaarung befindet sich in der Mitte des Versuchsaufbaus. Beide Zahnräder werden getrennt gelagert, wobei die Einhaltung des definierten Achsabstands über Führungselemente sichergestellt wird. Der Antriebsmotor treibt das Ritzel mit der vorgegebenen Drehzahl an. Die Regelung des anliegenden Drehmoments erfolgt am Rad mit Hilfe des Abtriebsmotors. Die Verbindung der Motoren mit den Zahnradwellen erfolgt mittels einer Metallbalgkupplung vom Typ BK5 (R+W Antriebselemente GmbH), die eine thermische Isolierung zwischen beiden Komponenten sicherstellt. Die Temperatur im Kontaktbereich der Zahnradpaarung wird optisch mit einem Pyrometer (Optris GmbH) an der Zahnflanke des Polymerrads gemessen.

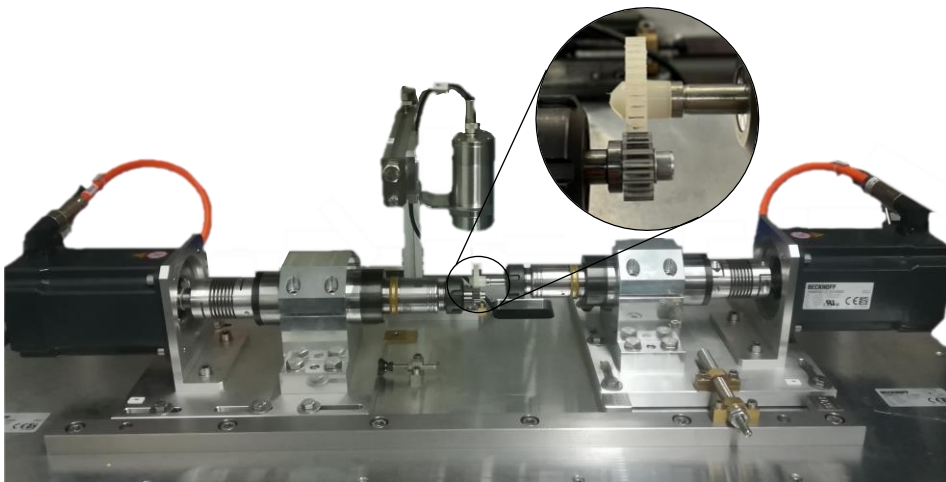


Bild 9: Getriebeprüfstand und untersuchte Zahnradpaarung

#### 4.4.2 Stift-Scheibe-Prüfung

Um den Einfluss einer variierenden Oberflächentopografie des metallischen Partners auf das Verschleißverhalten der Materialpaarung zu untersuchen, wurden zudem Modellversuche eingesetzt. In Kooperation mit dem Lehrstuhl für Kunststofftechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg wurden Stift-Scheibe-Versuche mit Stiften aus PA66 und metallischen Scheiben durchgeführt. Die einfache Geometrie der Scheiben ermöglicht eine gezielte Variation der Oberflächentopografie, die bei Zahnrädern nur mit erheblichem fertigungstechnischem Aufwand möglich ist.

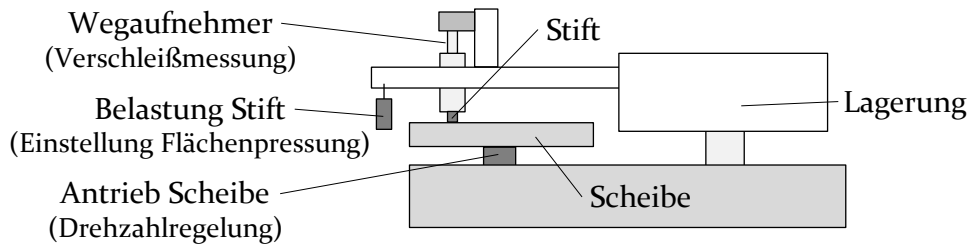


Bild 10: Schematischer Aufbau des Stift-Scheibe Prüfstands

Der Außendurchmesser der Prüfscheiben beträgt 110 mm und die Kontaktfläche des Stiftes 4 mm x 4 mm. Das Beanspruchungskollektiv im Modellversuch wird entsprechend dem Belastungsfall im Zahnradgetriebe gewählt. Bei einer Drehzahl von  $2294 \text{ min}^{-1}$  beträgt die maximale Gleitgeschwindigkeit des Ritzels  $0,54 \text{ m/s}$ . Die Flankenpressung am Wälzkreis liegt bei einem Drehmoment von 1 Nm bei  $4,04 \text{ N/mm}^2$ . Entsprechend werden eine Gleitgeschwindigkeit von  $0,5 \text{ m/s}$  und eine Flächenpressung von  $4 \text{ N/mm}^2$  eingestellt.

### 4.5 Charakterisierung der Bauteileigenschaften

Im Rahmen der Untersuchungen ist eine vollständige Charakterisierung der umforminduzierten Eigenschaften der Verzahnung sowie der verschleißbedingten Veränderungen erforderlich. Ausgewertet werden die Oberfläche sowie die geometrischen und mechanischen Eigenschaften.

#### 4.5.1 Topografie

Die Analyse der Topografie der Zahnflanken ist entscheidend, um sowohl die fertigungsbedingte Oberfläche als auch die verschleißbedingte Veränderung und somit die auftretenden Verschleißmechanismen zu

identifizieren. Die Erfassung erfolgt berührungslos mit einem konfokalen Laserscanning Messmikroskop VK-X 200 der Firma Keyence Corporation entsprechend der ISO 25178-602 [178]. Die Messungen wurden mit einem Objektiv mit 20-facher Vergrößerung durchgeführt, um eine hinreichende laterale Auflösung zur Auswertung der Oberflächenrauheit bei vertretbarer Messdauer sicherzustellen. Durch Zusammensetzung von Einzelbildern wird ein Bereich von 2,1 mm x 0,7 mm aufgenommen, wodurch eine ausreichend große Fläche zur Auswertung der Oberflächenkennwerte zur Verfügung steht. Die Korrektur der Form der Zahnflanke erfolgt durch Annäherung der Krümmung mit Hilfe eines Polynom 2.Grades. Anschließend wird die Rauheitsoberfläche aus der optisch gemessenen Oberfläche anhand einer Trennung zwischen Rauheit und Welligkeit durch Filterung mit der Grenzwellenlänge  $\lambda_c$  und dem kurzwelligen Profilfilter  $\lambda_s$  abgeleitet. Die beiden Filter werden auf Basis des arithmetischen Mittenrauwerths  $R_a$  der ungefilterten Oberfläche ausgewählt [179]. Für eine qualitative Beurteilung der Veränderung der Oberflächentopografie wird diese durch flächenhafte Farbplots dargestellt. Die quantitative Bewertung erfolgt durch Auswertung der gemittelten Rautiefe  $R_z$  [180] sowohl in als auch gegen die Wälzrichtung.

Zudem wird die metallische Oberfläche mittels energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) vermessen, um die Bildung eines Polymer-Transferfilms auf der Zahnflanke zu prüfen. Die Messung wird mit einer Beschleunigungsspannung ( $E_0$ ) von 10 kV, einem Detektorgitterpotential ( $E_G$ ) von 1000 V und einem Sondenstrom ( $I_p$ ) von 1,5 nA durchgeführt. Vor den Messungen werden die Metallritzeln mit Druckluft gereinigt, um lose Kunststoffpartikel zu entfernen.

#### 4.5.2 Geometrische Eigenschaften

Die Ermittlung der geometrischen Bauteileigenschaften der fließgepressten Zahnräder erfolgt hinsichtlich der Makrogeometrie zur Bewertung der Formfüllung sowie der Verzahnungsgenauigkeit. Zudem wird der Zahnverschleiß des Metallritzels und des Kunststoffrads erfasst.

##### Formfüllung

Die Makrogeometrie wird durch die vollflächige Digitalisierung der Zahnräder mit dem optischen 3D-Messsystem ATOS (GOM GmbH) mittels Streifenlichtprojektion und dem Triangulationsprinzip erfasst. Es erfolgt ein Geometrievergleich, um Abweichungen zur simulierten Zahngeometrie sowie zur Sollgeometrie zu ermitteln und in Farbplots zu visualisieren.

Durch den Abgleich wird die Prognosequalität des eingesetzten FE-Modells überprüft. Zudem werden Bereiche mit unzureichender Formfüllung ermittelt, anhand derer der nutzbare Anteil der Zahnradbreite und die Materialeffizienz des Prozesses bestimmt werden. Im Rahmen dieser Untersuchung wird eine Abweichung von der Sollgeometrie von mehr als 0,1 mm als unzureichende Formfüllung bewertet. Mit dieser Abweichung kann bestenfalls eine Verzahnungsgenauigkeit der Qualitätsstufe 12 nach ISO 1328 erreicht werden [19]. Bei größeren Abweichungen wird von einer nicht mehr funktionsfähigen Verzahnung ausgegangen.

### **Verzahnungsgenauigkeit**

Als wesentliche Parameter für die Verzahnungsgenauigkeit werden die Profil- und Flankenliniengesamtabweichungen nach ISO 1328 [19] ausgewertet. Die Vermessung der Zahnräder wurde gemäß industriellen Standards durch den Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik (FMT) der Universität Erlangen-Nürnberg auf einem taktilen 3D-Koordinatenmessgerät (KMG) vom Typ UPMC 1200 CARAT S-ACC (Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH) durchgeführt.

### **Zahnverschleiß**

Die Erfassung der verschleißbedingten Veränderung der Zahnkontur erfolgt durch Messung vor und im Verlauf der Verschleißversuche auf einem 3D-Koordinatenmessgerät vom Typ Leitz PMM 654 (Hexagon Metrology GmbH). Gegenüber der vollständigen Verzahnungsmessung nach ISO 1328 wird die Kontur lediglich durch eine Messung auf mittlerer Zahnradbreite erfasst. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass aufgrund des gleichmäßigen Eingriffes über die Zahnbreite der Verschleiß gleichförmig erfolgt und die vereinfachte Messung ausreichend ist. Der reduzierte Messaufwand ermöglicht die regelmäßige Erfassung der Zahnkontur zu festgelegten Lastzyklen im Verlauf der Verschleißversuche, wodurch die Identifikation von Verschleißphasen und die zeitabhängige Beschreibung des Verschleißverhaltens möglich ist.

## **4.5.3 Mechanische Eigenschaften**

Die mechanischen Eigenschaften der metallischen Verzahnung haben wesentlichen Einfluss auf das Verschleißverhalten. Vor diesem Hintergrund kommt der Ermittlung der umforminduzierten lokalen Gefügeveränderung und der resultierenden lokalen Festigkeit des Zahnprofils eine entscheidene Bedeutung zu.

## **Gefüge**

Zur Untersuchung des Werkstoffgefüges erfolgt die Präparation der Zahnräder durch Trennen, Einbetten und Polieren sowie Ätzung der Oberfläche. Die Aufnahmen des Gefüges erfolgen mit einem Lichtmikroskop vom Typ Aristomet (Leica Microsystems GmbH) und einer digitalen Fotokamera vom Typ DP25 der Firma Olympus Europa SE & Co. KG.

## **Lokale Verfestigung**

Die Mikrohärtigkeit ist ein geeigneter Indikator für die lokale Kaltverfestigung fließgepresster Bauteile [181]. Durch Analyse der Mikrohärtigkeit des Zahnprofils kann eine - bedingt durch lokal unterschiedliche Umformgrade und das Verfestigungsverhalten des Werkstoffs - inhomogene Härteverteilung ermittelt werden. Die Mikrohärtigkeitsmessungen werden auf einem Messgerät vom Typ Fischerscope HM2000 der Firma Helmut Fischer GmbH & Co. KG durchgeführt. Das Messprinzip basiert auf der Mikrohärtigkeitsmessung nach Vickers [182]. Die Prüfkraft von 196 mN (HV 0,02) und die Prüfdauer von 10 s werden nach der DIN EN ISO 6507 zur Erzielung einer ausreichenden Eindruckdiagonale von mindestens 0,02 mm gewählt [183]. Das Zahnprofil wird durch ein quadratisches Messfeld mit jeweils 32 Messpunkten in x- und y-Richtung aufgenommen, um bei einem mindestens erforderlichen Punktabstand von 60 µm eine ausreichend hohe Auflösung der Härtemessung zur Ermittlung der lokalen Verfestigung zu ermöglichen. Die qualitative Auswertung der Härteverteilung im Zahnprofil erfolgt durch Visualisierung der Einzelpunktmessungen in flächenhaften Farbplots. Die lokale Zahnflankenhärte wird zudem quantitativ aus den Messpunkten, die im Eingriffsbereich der Verzahnung liegen ermittelt.

## 5 Qualifizierung der Methoden

Im Folgenden werden die im Rahmen der Arbeit eingesetzten numerischen und experimentellen Methoden zur Untersuchung des Fließpressprozesses zur Verzahnungsherstellung sowie zur Ermittlung des Verschleißverhaltens qualifiziert. Zunächst wird die Prognosegüte des virtuellen Prozessmodells überprüft. Anschließend wird die Auswertemethodik zur experimentellen Untersuchung des Verschleißverhaltens beschrieben und exemplarisch angewendet. Zudem wird in Stift-Scheibe-Versuchen der Einfluss von Rautiefe und Vorzugsrichtung untersucht, um die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf fließgepresste Oberflächen sicherzustellen.

### 5.1 Validierung des numerischen Prozessmodells

Nachfolgend werden Umformversuche durchgeführt und im Referenzprozess Zahnräder aus den Werkstoffen 16MnCr5+A, CuZn37+C und AlMgSi T6 hergestellt. Die erzielbaren Bauteil- und Prozesseigenschaften werden ausgewertet und ein Abgleich der experimentellen Ergebnisse mit der numerischen Vorhersage vorgenommen, um die Prognosegüte des virtuellen Prozessmodells für alle untersuchten Werkstoffe sicherzustellen.

#### 5.1.1 Analyse und Abgleich der Bauteileigenschaften

Als geometrische Bauteileigenschaften werden die Formfüllung und nutzbare Zahnradbreite sowie die erzielbare Verzahnungsgenauigkeit ausgewertet. Weiterhin wird die Verfestigung des Zahnprofils untersucht.

##### Formfüllung

Bild 11 zeigt einen Abgleich zwischen der numerisch ermittelten Geometrie und den experimentell hergestellten Zahnrädern. Hierzu wurden die Bauteile vollflächig digitalisiert.

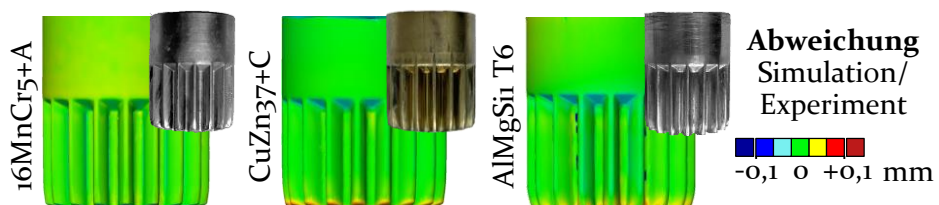


Bild 11: Abgleich der Makrogeometrie in Experiment und Simulation

Die aus den verschiedenen Werkstoffen hergestellten Zahnräder weisen im unteren Verzahnungsbereich ein unterschiedliches Formfüllungsverhalten auf. Die Abweichungen zwischen Simulation und Experiment betragen allerdings weniger als 0,1 mm, was auf eine gute Prognosegüte des numerischen Modells hinweist. Eine detaillierte Analyse der Formfüllung erfolgt in Bild 12.

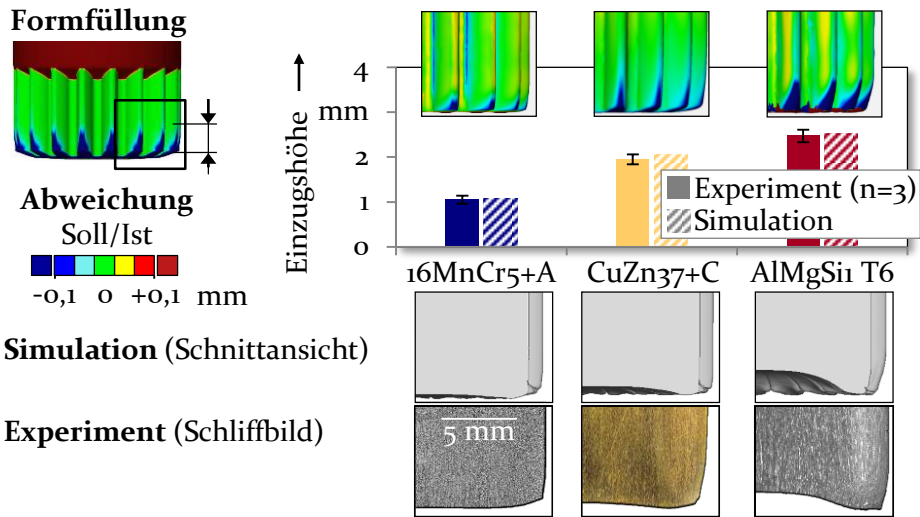


Bild 12: Analyse der Formfüllung in Experiment und Simulation

Die aus 16MnCr5+A fließgepressten Zahnräder zeigen eine gleichmäßige Formfüllung über die Bauteilhöhe. Lediglich im unteren Bereich liegt ein geringfügiges Materialdefizit vor, das auf ein Vorseilen des Werkstoffs in axialer Richtung sowie einen unzureichenden Werkzeugkontakt zu Prozessbeginn zurückzuführen ist und für Stahlwerkstoffe bereits in der Literatur [184] dokumentiert wurde. Der Einzug begrenzt die nutzbare Zahnradbreite. Bei den im Referenzprozess fließgepressten Messing- und Aluminiumzahnradern ist neben dem Materialeinzug auch eine konkave Ausformung der Bauteilunterseite zu erkennen. Diese ist bei der Umformung von AlMgSi1 T6 stark ausgeprägt, wodurch die nutzbare Zahnradbreite reduziert wird. Die Zahnräder aus 16MnCr5+A weisen die geringste Einzugshöhe von  $1,05 \pm 0,05$  mm. Für CuZn37+C ist eine Zunahme auf  $1,95 \pm 0,09$  mm und für AlMgSi1 T6 auf  $2,47 \pm 0,13$  mm festzustellen. Unter Berücksichtigung einer umgeformten Höhe von 12,8 mm beträgt die Materialausnutzung für 16MnCr5+A 77,4 %. Diese verringert sich für CuZn37+C auf 71,9 % und für AlMgSi1 T6 auf 66,9 %.

Die Gegenüberstellung der Schnittansicht aus der Simulation und den Schliffbildern der Realbauteile zeigt eine sehr gute Übereinstimmung. Erkennbar ist, dass die numerisch identifizierte konkave Ausformung der Bauteilunterseite bei Umformung von AlMgSi T6 auch im Experiment auftritt.

Der Abgleich der Einzugshöhen zeigt eine hohe Prognosegüte der Simulation, die entscheidend ist, um Einflussgrößen auf die Formfüllung numerisch zu identifizieren. Hierdurch wird es ermöglicht, Maßnahmen zur gezielten Steigerung der Formfüllung zu untersuchen und die Materialeffizienz des Umformprozesses zu verbessern.

### Verzahnungsgenauigkeit

Eine ausführliche Analyse der Zahngeometrie wird durch Ermittlung der Gesamtabweichungen von Profil- und Flankenlinie entsprechend der ISO 1328 [19] vorgenommen. Die aus den verschiedenen Werkstoffen hergestellten Zahnräder weisen deutlich abweichende Verzahnungsgenauigkeiten auf (Bild 13).

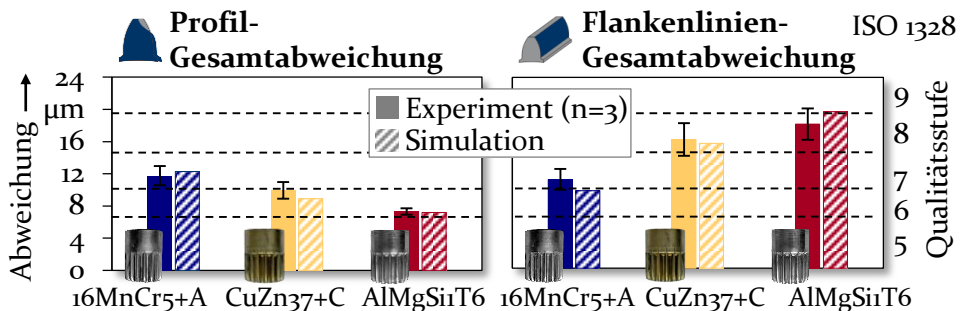


Bild 13: Abgleich der Verzahnungsgenauigkeiten in Experiment und Simulation

Die höchste Verzahnungsgenauigkeit (Stufe 7) wird experimentell für die Zahnräder aus 16MnCr5+A mit einer Profil-Gesamtabweichung von 11,75 µm und einer Flankenlinien-Gesamtabweichung von 11,18 µm ermittelt. Die Werte der Profilabweichungen nehmen für den Messing- und Aluminiumwerkstoff auf 9,93 µm und 7,30 µm ab. Hinsichtlich der Profilgenauigkeit verbessert sich die erreichbare Qualität der Verzahnungen aus CuZn37+C auf Stufe 6 sowie aus AlMgSi T6 auf Stufe 5. Dagegen sind die Flankenlinienabweichungen gegenüber dem Stahlwerkstoff deutlich erhöht. Die Flankenlinien-Gesamtabweichung betragen für den Messingwerkstoff 16,30 µm (Stufe 8) und für Aluminium 18,12 µm (Stufe 9). Trotz reduzierter Profilabweichungen der Messing- und Aluminiumzahnäder gegenüber Stahl ist die Verzahnungsgenauigkeit aufgrund der erhöhten

Flankenlinienabweichungen ein bis zwei Stufen schlechter zu bewerten. Die Qualität ist somit unzureichend für hohe Anforderungen oder den Einsatz in Stellgetrieben [20], weshalb eine Verbesserung der Genauigkeit angestrebt wird.

Sowohl für den Stahl-, den Messing-, als auch den Aluminiumwerkstoff werden die Qualitätsstufen mit Hilfe des numerischen Prozessmodells unter Berücksichtigung der Standardabweichung korrekt vorhergesagt. Die präzise Prognose der umformbedingten Abweichungen der Zahnflanke ist essentiell, um Einflussgrößen innerhalb des Fließpressprozess auf die Verzahnungsgenauigkeit zu untersuchen.

### Verfestigung

Bild 14 zeigt eine Gegenüberstellung der Verfestigung des Zahnprofils aus Experiment und Simulation. Für die experimentell hergestellten Zahnräder ist die Mikrohärtigkeit und für die simulierten Zahnräder die resultierende Fließspannung  $k_f$  dargestellt.

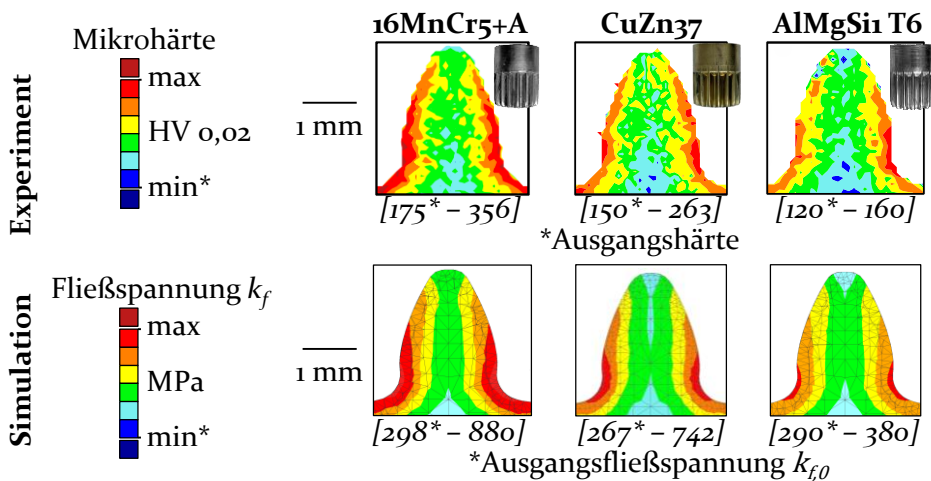


Bild 14: Abgleich der Verfestigung in Experiment und Simulation

Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden für beide Farbskalen jeweils die Ausgangshärte des Materials sowie die Anfangsfließspannung  $k_{f,0}$  als untere Grenze ausgewählt. Die obere Grenze wird durch den maximalen, lokalen Härtewert sowie die maximale, lokale Fließspannung festgelegt. Für alle drei Werkstoffe ergibt sich eine vergleichbare Verfestigungsverteilung entlang des Zahnprofils mit der maximalen Festigkeit im Fuß- und Flankenbereich, wohingegen die Härtezunahme in der Zahnmitte und dem Zahnkopf gering ist.

Es ist allerdings eine geringe relative Härtezunahme - bezogen auf die Grundhärte des Werkstoffs - für AlMgSi1 T6 und CuZn37+C im Vergleich zu 16MnCr5+A festzustellen. Dies wird auf das reduzierte Verfestigungspotential zurückgeführt, welches bei Auswertung der Fließkurven (Bild 7) aufgrund einer vergleichsweise geringen Sättigungsfließspannung erkennbar ist.

Die unterschiedliche Härtezunahme der Werkstoffe wird durch das numerische Prozessmodell qualitativ sehr gut vorhergesagt. Dies ist entscheidend, um die einsatzrelevante lokale Verfestigung der Zahnflanke abzuschätzen und Methoden zur gezielten Erhöhung zu identifizieren.

### Oberflächentopografie

Nachfolgend wird die umforminduzierte Oberflächentopografie analysiert, die im numerischen Modell nicht vorhergesagt werden kann. In Bild 15 erfolgt eine Gegenüberstellung der Topografie und Rauheitswerte.

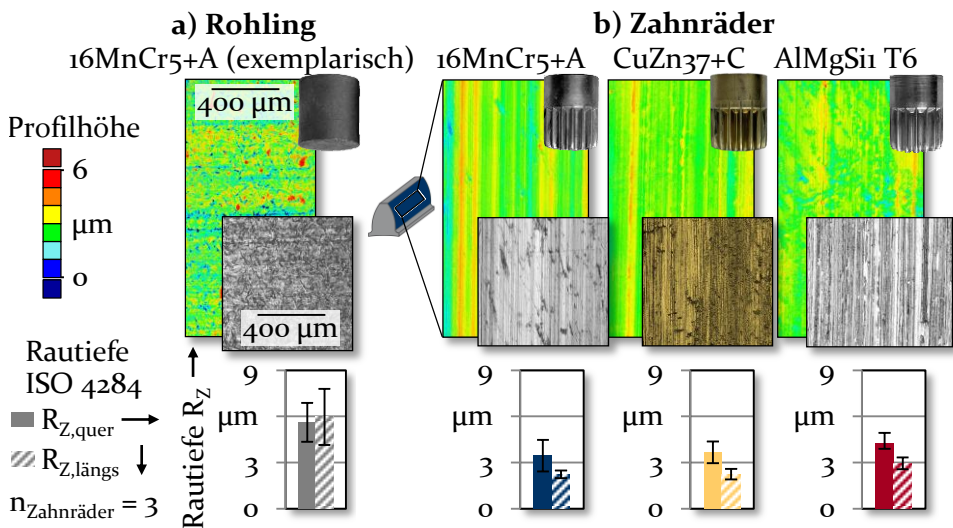


Bild 15: Oberflächentopografien der Zahnflanken im Referenzprozess

Die Rohlinge (Bild 15 a) weisen aufgrund der Aufbringung des Schmierstoffs in einer Trommelanlage eine gleichmäßige, ungerichtete Topografie mit R<sub>Z</sub>-Werten von 5,62 bis 5,96 ± 1,82 µm auf. Im Fließpressprozess resultieren vergleichbare Oberflächen der Zahnflanken bei allen drei Werkstoffen (Bild 15 b). Die Topografie sowie die Rauheitswerte zeigen eine deutliche Einglättung in Längsrichtung, die der Wirkrichtung der Umformpresse entspricht. Die Einglättung ist auf den hohen Kontaktdruck zwischen

Werkstück und Matrize sowie die hohe Oberflächengüte der Matrize ( $R_z = 1,46 \pm 0,07 \mu\text{m}$ ) zurückzuführen. Die  $R_z$ -Werte in Umformrichtung ( $R_{z,\text{längs}}$ ) entsprechen 2,23 bis  $2,95 \pm 0,38 \mu\text{m}$ . In Wälzrichtung ( $R_{z,\text{quer}}$ ) liegen diese dagegen deutlich höher, zwischen 3,45 und  $4,27 \pm 1,03 \mu\text{m}$ .

Die Auswertung zeigt, dass eine gerichtete Topografie im Umformprozess resultiert, deren Einfluss auf das Verschleißverhalten zu untersuchen ist. Die Oberflächen weisen eine hohe Reproduzierbarkeit auf, womit die von GROCHE ET AL. beschriebene Leistungsfähigkeit der Einsichtschiemersysteme [144] bestätigt und deren Eignung zur Herstellung einsatzfertiger Zahnräder nachgewiesen wird.

### 5.1.2 Analyse und Abgleich der Prozesseigenschaften

Im Folgenden werden die Prozesseigenschaften ausgewertet. Es werden die maximale Prozesskraft und die Werkzeugbeanspruchung analysiert.

#### Prozesskraftverlaufe

Die korrekte Vorhersage des Prozesskraftverlaufs sowie der Maximalkraft ist essentiell, um die Werkzeugbeanspruchung zu bewerten. Bild 16 zeigt den Abgleich der Prozesskraftverlaufe aus Experiment und Simulation.

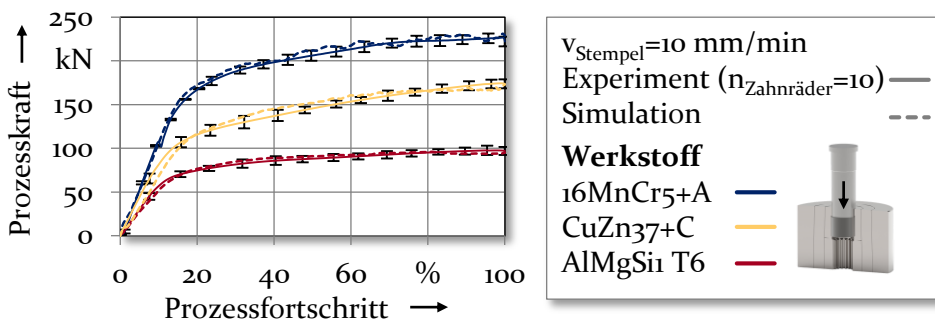


Bild 16: Abgleich der Prozesskraftverlaufe in Experiment und Simulation

Es wird eine sehr gute Übereinstimmung der Kraft-Weg-Kurven aller drei Werkstoffe festgestellt. Aufgrund der reduzierten Satigungsflispannung resultiert trotz vergleichbarer Anfangsflispannungen (Bild 7) ein geringerer Anstieg der Fließspannung bei Umformung von CuZn37+C und AlMgSi1 T6 gegenüber 16MnCr5+A. Die Abweichungen der maximalen Prozesskräfte in Experiment und Simulation betragen weniger als 3%. Es wird eine präzise Vorhersage der auftretenden Werkzeugbeanspruchung und der elastischen Auffederung der Matrize ermöglicht.

## Werkzeugbeanspruchung

In Bild 17 wird mit Hilfe des numerischen Prozessmodells die Vergleichsspannung von Mises ( $\sigma_{v,Mises}$ ) im Verzahnungseinlauf der Matrize bei maximaler Prozesskraft ausgewertet. Auf Grundlage dieser werden Rückschlüsse auf die elastische Auffederung der Matrize und das Auftreten kritischer Kerbspannungen gezogen. Die maximalen Prozesskräfte liegen bei  $221,9 \pm 2,3$  kN für 16MnCr5+A, sowie bei  $173,9 \pm 1,4$  kN für CuZn37+C und lediglich  $97,1 \pm 0,8$  kN für AlMgSi1 T6. Die Auswertung der Vergleichsspannung ergibt kritische Kerbspannungen im Schulterbereich der Matrize von bis zu  $3.157 \pm 205$  MPa bei Umformung von 16MnCr5+A, die auf ein durch den Stempel auf die Fließpressschulter eingebrachtes Biegemoment zurückzuführen sind.

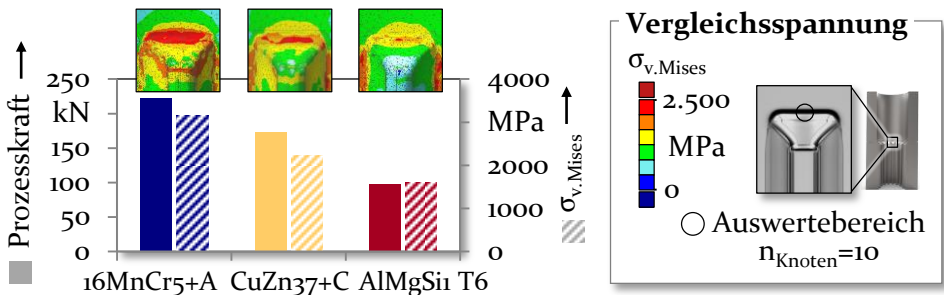


Bild 17: Numerisch ermittelte maximale Prozesskraft und Werkzeugbeanspruchung

Die Spannungskonzentration beträgt beim Fließpressen der Messing- und Aluminiumwerkstoffe lediglich  $2.238 \pm 143$  MPa und  $1.610 \pm 68$  MPa. Es zeigt sich für alle Werkstoffe eine gute Korrelation der maximalen Prozesskraft mit der Vergleichsspannung, weshalb diese als Indikator für das Auftreten versagenskritischer Werkzeugbeanspruchungen und die Bewertung der erzielbaren Werkzeugstandzeit herangezogen wird.

## 5.2 Prüfung der Vorgehensweise zur Auswertung des Verschleißverhaltens

Im Folgenden wird die Methode zur Ermittlung des Verschleißverhaltens und zur Identifikation der Verschleißmechanismen qualifiziert. Zudem wird im Modellversuch der Einfluss unterschiedlicher prozessbedingter Oberflächentopografien untersucht, um eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf den Einsatz konventionell hergestellter sowie fließgepresster Zahnräder zu gewährleisten. Bild 18 zeigt das methodische Vorgehen zur Auswertung des Verschleißverhaltens.

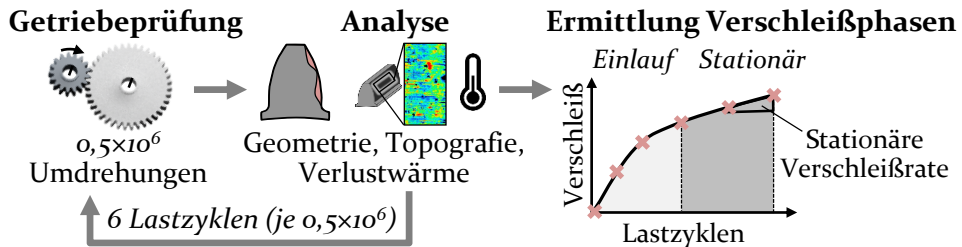


Bild 18: Methodische Vorgehen zur Auswertung des Verschleißverhaltens

Die Verschleißversuche werden auf dem in Bild 8 beschriebenen Getriebeprüfstand durchgeführt. Nach jeweils  $0,5 \times 10^6$  Umdrehungen wird die Getriebeprüfung unterbrochen und eine Analyse der verschleißbedingten Geometrie und Topografie vorgenommen. Zudem wird die Verlustwärme im Kontaktbereich durch eine kontinuierliche Temperaturmessung ermittelt. Die Auswertung des zeitlichen Verlaufs des Verschleißverhaltens ermöglicht die Identifikation der aus der Literatur bekannten [33] Einlaufprozesse.

Durch die Durchführung der Verschleißversuche bis  $3,0 \times 10^6$  Umdrehungen und Anwendung der Auswertemethodik nach jeweils  $0,5 \times 10^6$  Umdrehungen wird für alle Versuchsreihen sichergestellt, dass der Übergang von einer Einlauf- in die stationäre Verschleißphase bestätigt wird. Dies ermöglicht die Berechnung einer stationären Verschleißrate, die den volumetrischen Verschleiß in  $\mu\text{m}^3$  je  $10^6$  Umdrehungen angibt. Auf dessen Grundlage ist die Bewertung des Verschleißverhaltens und die Abschätzung der Lebensdauer der Zahnradpaarung möglich.

### 5.2.1 Analyse der verschleißbedingten Zahngeometrie

Im Folgenden wird der Verschleiß der Zahnkontur exemplarisch dargestellt und die Auswertemethodik beschrieben. Bild 19 zeigt Schliffbilder der verschlissenen Zahnkonturen, sowie die Analyse des Verschleißvolumens und der lokalen Abnahme der Zahndicke durch Messung mittels KMG.

Der Verschleiß tritt an den beiden rechten Zahnflanken, die sich während des Betriebes im Eingriff befinden, ungleichmäßig verteilt auf. Die Erfassung der Zahndicke am Teilkreis oder des Zweikugelmaßes als Prüfmaße, die in der Industrie [177] oder bisherigen Forschungsarbeiten [41] ausgewertet werden, ist daher nicht ausreichend. Aus diesem Grund erfolgt die vollständige Erfassung der Zahnkontur mittels KMG und die Auswertung des Zahnvolumens sowie der Zahndicke entlang der Zahnflanke mit einem Matlab-Skript (The MathWorks, Inc.).

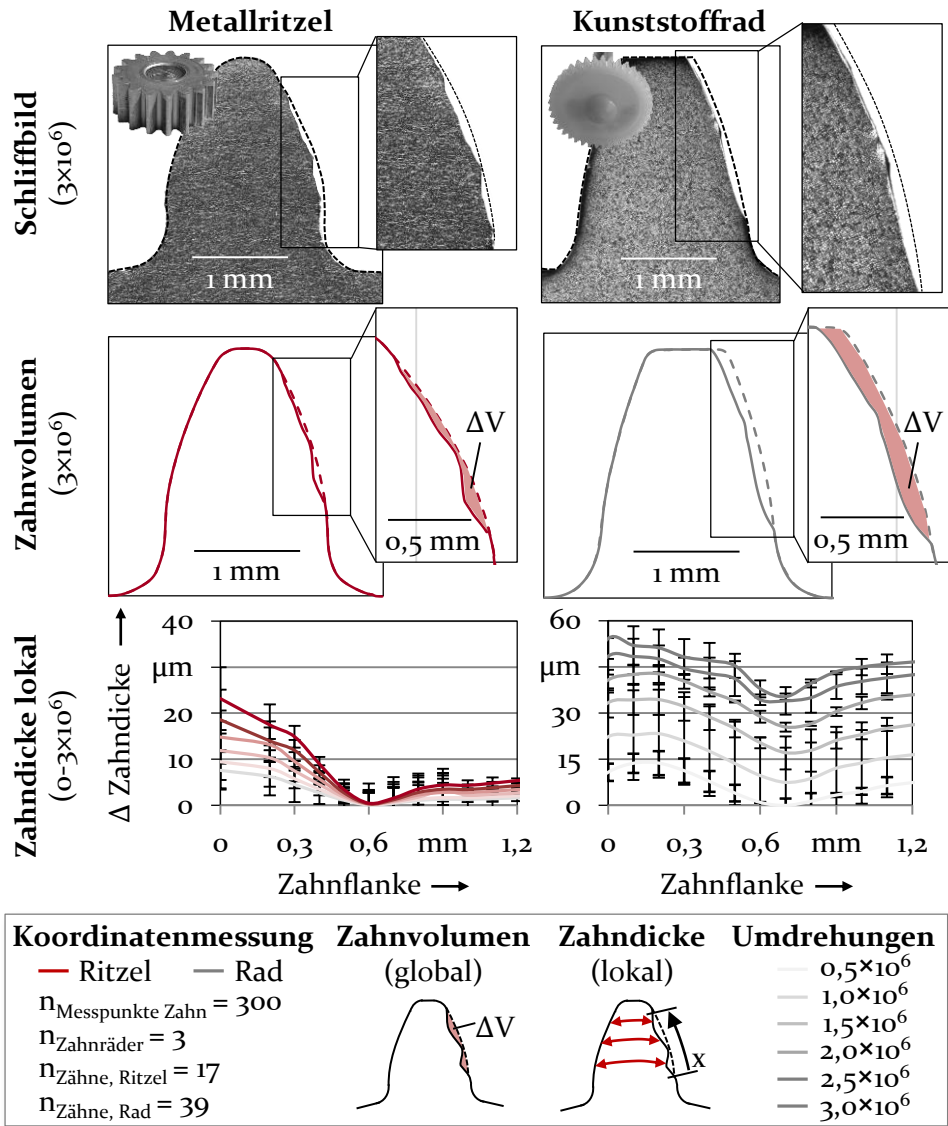


Bild 19: Exemplarische Auswertung des Zahnverschleißes (Paarung AlMgSi1 T6 - PA66)

Zusätzlich wird die Abnahme der Zahndicke entlang der Zahnflanke bestimmt, um den lokalen Verschleiß im zeitlichen Verlauf zu ermitteln. Die Auswertung erfolgt für jeden Zahn einzeln, wodurch die Ermittlung eines aussagekräftigen Mittelwertes und die Abschätzung der Streuung ermöglicht wird.

### 5.2.2 Identifikation der Verschleißarten

Zur Ermittlung der Verschleißmechanismen wird die Veränderung der Oberfläche der metallischen Zahnflanke analysiert. In Bild 20 wird auf die im Rahmen der Arbeit identifizierten Verschleißarten eingegangen.

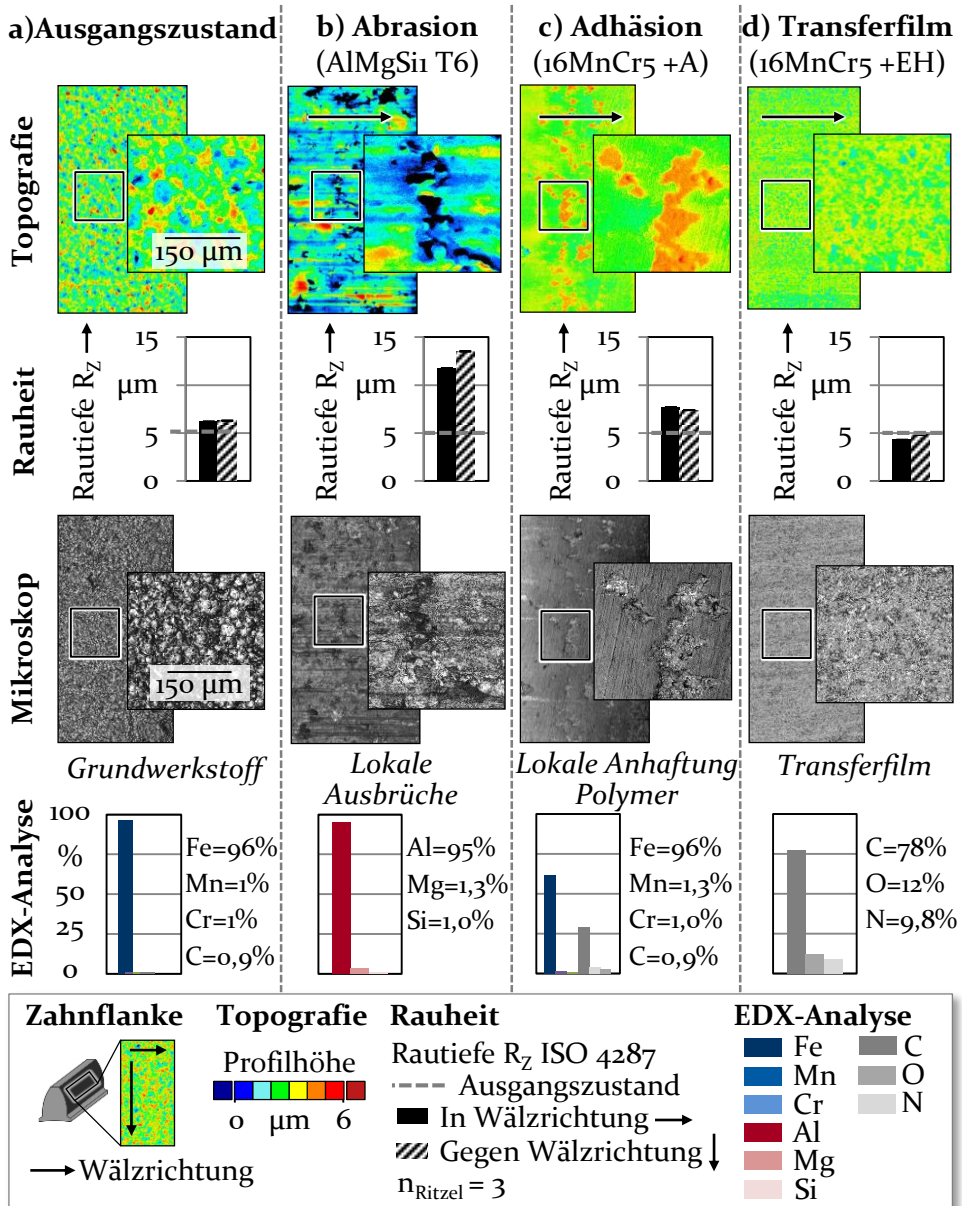


Bild 20: Identifikation der Verschleißarten anhand der Veränderung der Oberfläche

Neben der Auswertung von Topografie und Rautiefe wurden auch EDX-Analysen durchgeführt, um die Anhaftung von Polymerwerkstoff auf der metallischen Zahnflanke sowie die Ausbildung eines Transferfilms zu überprüfen. Vor den Verschleißversuchen weisen die Zahnräder aufgrund der vorausgegangenen Strahlbehandlung eine gleichmäßige, ungerichtete Topografie auf (Bild 20 a).

Infolge einer unzureichenden Festigkeit kommt es zu abrasivem Verschleiß und dem Ausbrechen von Partikeln aus der Oberfläche (Bild 20 b). Gegenüber dem Ausgangszustand wird die Zahnflanke stark aufgeraut und es sind Ausbrüche im Mikroskop- sowie dem Topografiebild erkennbar. Aufgrund der Abrasion werden Riefen in Wälzrichtung ausgebildet, weshalb eine Vorzugsrichtung der Oberfläche mit erhöhter Rautiefe senkrecht zur Wälzrichtung resultiert.

Die Adhäsion (Bild 20 c) einzelner Polymerpartikel ist anhand flächiger Rauheitsspitzen in der Topografie erkennbar. Bestätigt wird dies durch die optische Aufnahme der Zahnflanke sowie der EDX-Analyse, die Materialanteile des Polymers, insbesondere Kohlenstoff, auf der Oberfläche anzeigt. Dagegen wird die in Bild 20 d dargestellte Oberfläche deutlich einglättet, da Rauheitsspitzen abgetragen und -täler mit einem Transferfilm zugesetzt werden, der eine reibungsreduzierende Wirkung aufweist [7].

Der Transferfilm wird durch den Nachweis der Elemente Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Stickstoff (N) des Polyamidmaterials PA66 ( $C_{12}H_{22}N_2O_2$ ) bestätigt. Aufgrund der geringen Atommasse von Wasserstoff (H) kann dieser nicht nachgewiesen werden. Der Nachweis von C, O und N erfolgt mit einer lateralen Auflösung von 2,3  $\mu\text{m}$ , 1,4  $\mu\text{m}$  und 1,3  $\mu\text{m}$  [185], woraus sich die Mindestdicke des Transferfilms ableiten lässt. Die EDX-Messung ermöglicht die sichere Bestätigung der Transferfilmbildung, wohingegen sich bisherige Untersuchungen (Tabelle 1) lediglich auf optische Auswertungen stützten.

### 5.2.3 Anwendung der Auswertemethode

Nachfolgend wird die Anwendung der Auswertemethode (Bild 18) demonstriert. In Bild 21 ist exemplarisch das Verschleißverhalten der Paarung AlMgSi<sub>1</sub>T6-PA66 dargestellt. Insgesamt werden  $3,0 \times 10^6$  Umdrehungen durchgeführt, wobei eine Einlaufphase durch anfänglich erhöhte Verschleißraten sowie Zahnflankentemperaturen identifiziert wird (Bild 21 a).

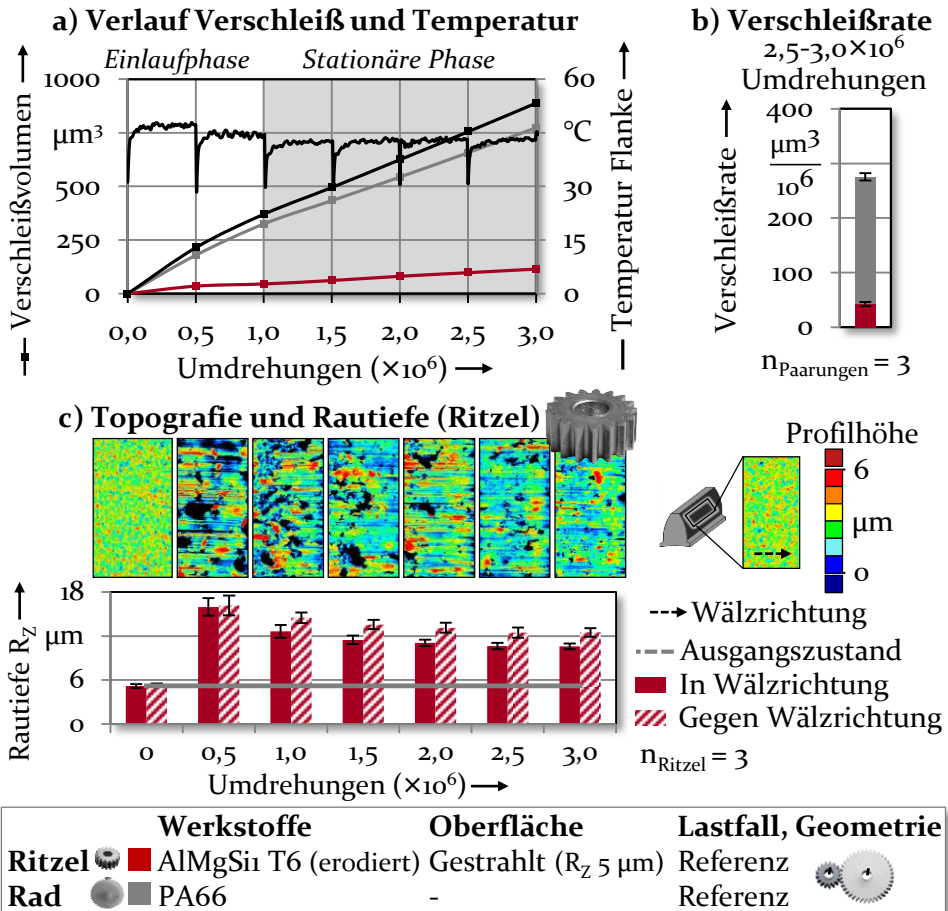


Bild 21: Verschleißverhalten der Paarung AlMgSi1 T6-PA66 (exemplarisch)

Aufgrund der Unterbrechung der Verschleißversuche nach jeweils  $0,5 \times 10^6$  Umdrehungen zur Auswertung der Zahngeometrie und -flankentopografie fällt die Temperatur jeweils ab, erreicht aber nach weniger als 100.000 Umdrehungen bereits wieder das vorherige Niveau. Es wird deutlich, dass sich nach  $1,0 \times 10^6$  Umdrehungen sowohl ein konstantes Niveau der Zahnflankentemperatur als auch ein gleichmäßiger Verlauf des Verschleißvolumens einstellen. Dies wird auf das Auftreten einer stationären Verschleißphase zurückgeführt. Vor diesem Hintergrund erfolgt die Auswertung der stationären Verschleißrate aller Paarungen zwischen  $2,5$  und  $3,0 \times 10^6$  Umdrehungen (Bild 21 b).

Das stationäre Verschleißverhalten wird durch die Auswertung der Topografie und Rautiefe der Zahnflanke (Bild 21 c) bestätigt. Nach einer

anfänglich starken Aufrauung wird die Rautiefe reduziert und erreicht ein konstantes Niveau ab  $1,5 \times 10^6$  Umdrehungen.

Die vorgestellte Methodik ermöglicht die Auswertung des zeitlichen Verlaufs des Verschleißes und die Ermittlung des stationären Verschleißverhaltens. Die Verschleißphasen werden durch Analyse der Verlustwärme und der Veränderung der Topografie bestätigt. Durch die vollständige Erfassung der Zahnflanken beider Partner können gegenüber bisherigen Untersuchungen (Tabelle 1) Auswirkungen eines veränderten Eingriffsverhaltens auf den lokalen Verschleiß sowie ein abweichendes Verhalten von Rad und Ritzel festgestellt werden. Die Generierung eines umfassenden Verständnisses der Einflussgrößen wird durch Identifikation der Verschleißarten mittels Topografieanalyse und EDX-Messung gestützt.

#### 5.2.4 Übertragbarkeit auf fließgepresste Oberflächen

Die Analyse der Topografie der fließgepressten Zahnräder zeigt, dass eine gerichtete Oberfläche mit geringer Rautiefe und Vorzugsrichtung entgegen der Wälzrichtung resultiert (Bild 15). Der Einfluss der Rautiefe auf die Verschleißmechanismen Adhäsion und Abrasion ist aus der Literatur bekannt [32]. Es bestehen allerdings keine Erkenntnisse darüber, wie sich die Vorzugsrichtung auswirkt. Vor diesem Hintergrund wurde in einer Kooperation mit dem Lehrstuhl für Kunststofftechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg der Einfluss von Rautiefe und Vorzugsrichtung metallischer Oberflächen auf das Verschleißverhalten der Materialpaarung im Stift-Scheibe-Versuch untersucht [186].

Die einfache Geometrie der Prüfscheiben ermöglicht eine gezielte Variation der Topografie durch Schleif- und Strahlprozesse. Aufgrund der vergrößerten Kontaktflächen sowie der hohen Gleitanteile, die maßgeblich für den Verschleiß der Materialpaarung sind [56], sind gegenüber Getriebeversuchen wesentlich reduzierte Prüfdauern erzielbar. Zudem werden Auswirkungen fertigungsbedingter geometrischer Abweichungen der Zahnkontur vermieden, wodurch eine gezielte Untersuchung des Einflusses der Oberflächentopografie möglich ist. Die Modellversuche wurden mit einsatzgehärteten Scheiben aus 16MnCr5 durchgeführt, da in Vorversuchen bei reduzierter Festigkeit Abrasion der Oberfläche auftrat, weshalb sich die initiale Topografie bei diesen Paarungen nicht auf das Verschleißverhalten auswirkt. Untersucht wurde die Variation der Rautiefe  $R_z$  im Bereich von 0,5 bis 6,0  $\mu\text{m}$  sowie der Vorzugsrichtung gegen (Längs), in (Quer) sowie ohne Bezug zur Wälzrichtung (Ungerichtet), die in Bild 22 dargestellt ist.

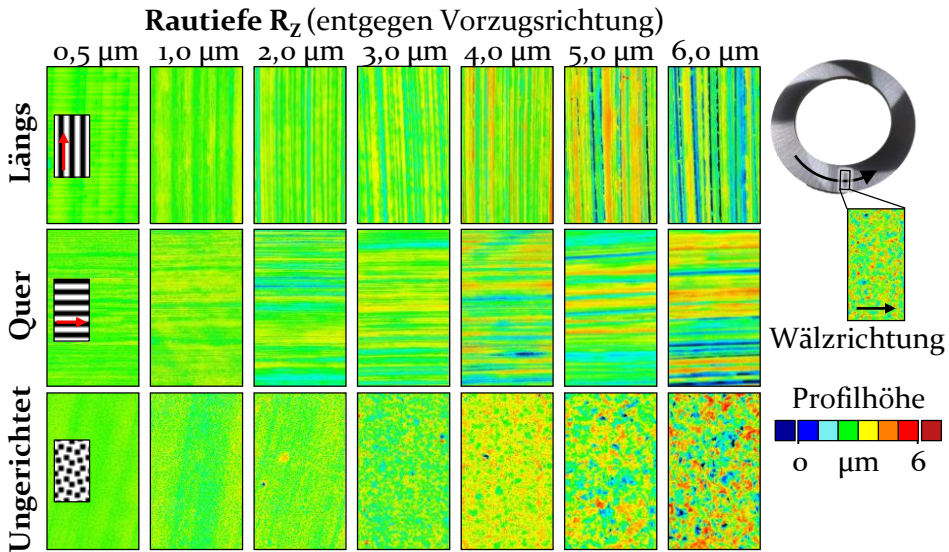


Bild 22: Variation von Rautiefe und Vorzugsrichtung der Prüfscheiben (16MnCr5+EH)

Anschließend wurde die Veränderung der Oberfläche charakterisiert und die Ausbildung eines Transferfilms durch EDX-Analysen überprüft. Auf dieser Grundlage wurden in Bild 23 die in Abhängigkeit von Rautiefe und Vorzugsrichtung auftretenden Verschleißmechanismen ermittelt und Modellvorstellungen abgeleitet [186].

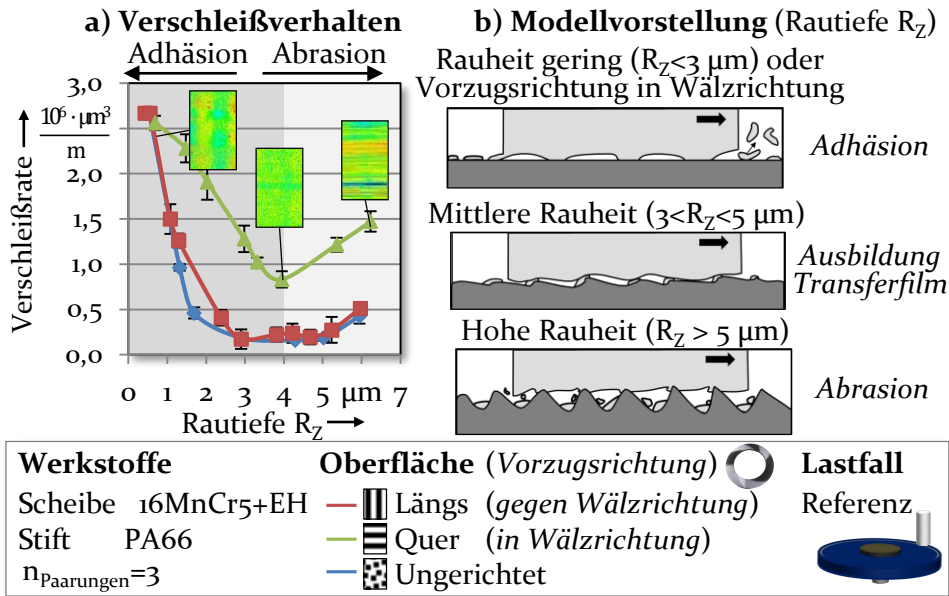


Bild 23: Einfluss der Oberfläche auf den Verschleiß (a) und Modellvorstellung (b) [186]

Für die Oberflächen mit Vorzugsrichtung gegen Wälzrichtung (längs), die durch VFP resultieren, folgt ein nahezu identisches Verschleißverhalten (Bild 23 a) in Abhängigkeit der Rautiefe  $R_z$  wie bei den Oberflächen ohne Vorzugsrichtung (ungerichtet), die sich beispielsweise auch bei spanender Verzahnungsherstellung ergeben. Die Zunahme des Verschleißes bei geringer Rautiefe aufgrund Adhäsion sowie bei hoher Rauheit infolge von Abrasion führt zu einem Verschleißoptimum bei mittlerer Rauheit ( $3 < R_z < 5 \mu\text{m}$ ), das bereits für ungerichtete Oberflächen von KÜNKEL ermittelt wurde [39].

Dagegen tritt bei Einsatz der *quer* geschliffenen Oberflächen mit Vorzugsrichtung in Wälzrichtung zwar ein qualitativ gleicher Zusammenhang zwischen Rautiefe  $R_z$  und Verschleiß auf, es resultieren allerdings durchweg höhere Verschleißraten. Das Verschleißminium folgt bei  $R_z = 4 \mu\text{m}$ . Es wird allerdings keine vollständige Ausbildung eines verschleißmindernden Transferfilms ermöglicht, was auf die in Wälzrichtung lokal geringe Rauheit zurückgeführt wird (Bild 23 b). Bei zunehmender Rauheit weisen die Oberflächen zwar optimale Rautiefen ( $3 < R_z < 5 \mu\text{m}$ ) in Wälzrichtung auf, aber aufgrund der Riefen eine hohe Rauheit in entgegengesetzter Richtung, die wiederum zu abrasivem Verschleiß führt. Eine Berücksichtigung der Rautiefe ohne Einbeziehung der Vorzugsrichtung ist daher nicht ausreichend.

### 5.3 Bewertung der Methoden

Der Abgleich von Simulation und Experiment belegt die hohe Prognosequalität des virtuellen Prozessmodells. Aus diesem Grund wird dieses für die Untersuchung von Einflussgrößen auf die einsatzrelevanten Bauteileigenschaften eingesetzt.

Zudem ermöglicht das Vorgehen zur Charakterisierung des Verschleißverhaltens durch Erfassung der Veränderung der Zahngeometrie, Topografie und Flankentemperatur die Identifikation der Verschleißmechanismen. Die Modellversuche zeigen, dass sowohl bei den durch VFP hergestellten, als auch bei den durch EDM und Abrasivstrahlen gefertigten Zahnrädern ein vergleichbares Verschleißverhalten in Abhängigkeit der Rautiefe zu erwarten ist. Lediglich bei einer Vorzugsrichtung in Wälzrichtung, die beispielsweise durch die Umformrichtung beim Querfließpressen resultiert [187], folgen höhere Verschleißraten aufgrund einer erhöhten Adhäsion. Es ist eine Berücksichtigung der fertigungsbedingten Topografie sowohl in Bezug auf die Rautiefe als auch die Vorzugsrichtung erforderlich.

Vor diesem Hintergrund werden für die Untersuchungen in Kapitel 6 gestrahlte Zahnräder mit einer Rautiefe von  $R_z = 5,10 \pm 0,63 \mu\text{m}$  eingesetzt. Hierdurch wird das Auftreten adhäsiven Verschleißes vermieden und die Ausbildung eines Transferfilms ermöglicht.

# 6 Ermittlung von Einflussgrößen auf das Verschleißverhalten

In diesem Kapitel werden Einflüsse der Bauteileigenschaften fließgepresster Zahnräder auf das Verschleißverhalten der Materialpaarung Metall-Kunststoff ermittelt. Zunächst wird der Einfluss des metallischen Werkstoffs und des Werkstoffzustands sowie der Zahngeometrie untersucht. Abschließend werden die identifizierten Verschleißmechanismen zusammengefasst.

## 6.1 Einfluss des metallischen Werkstoffs und des Werkstoffzustands auf das Verschleißverhalten

Nachfolgend wird der Einfluss des metallischen Werkstoffs und der Härte untersucht. Zu diesem Zweck werden erodierte Zahnräder mit gezielt variiertem Werkstoffzustand (Bild 6) eingesetzt.

### 6.1.1 Stahl

Zunächst wird das Verschleißverhalten der Stahl-Polyamid-Paarungen ermittelt. Bild 24 zeigt den Verschleißverlauf (a) und die resultierenden stationären Verschleißraten und Zahnflankentemperaturen (b).

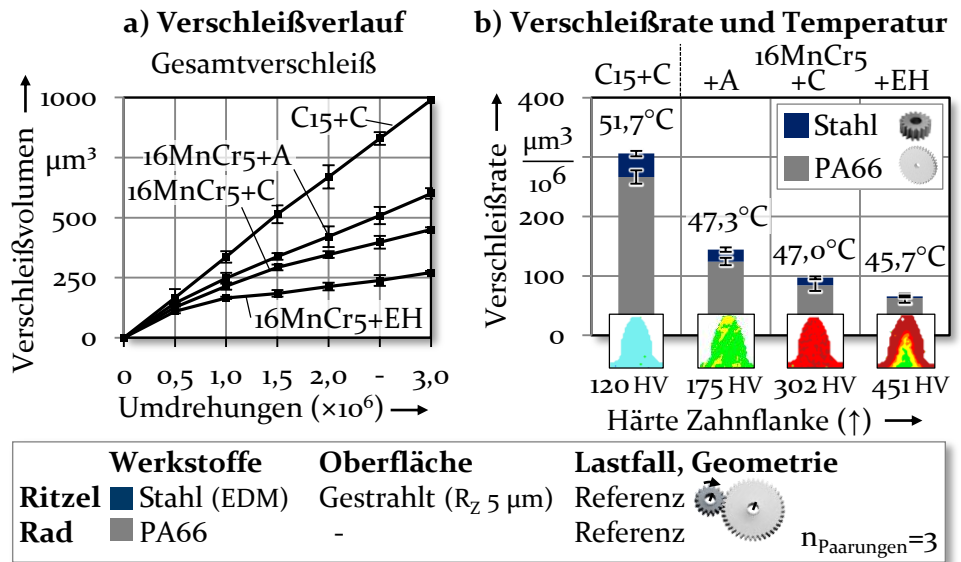


Bild 24: a) Verschleißverlauf und b) stationärer Verschleiß (Stahl-PA66)

Der höchste Gesamtverschleiß nach  $3,0 \times 10^6$  Umdrehungen wird bei Einsatz des C15-Ritzels mit der geringsten Härte gemessen. Die Paarungen mit C15 und 16MnCr5 +A zeigen ein weitgehend lineares Verschleißverhalten. Im Gegensatz dazu folgen bei Einsatz von 16MnCr5 und 16MnCr5+EH eine Einlauf- und stationäre Verschleißphase. In Bild 24 b sind die Verschleißraten sowie die Zahnflankentemperaturen der stationären Verschleißphase dargestellt. Der Verschleiß tritt überwiegend am Polymerrad auf, wobei auch am C15- und 16MnCr5+A-Ritzel maßgeblicher Verschleiß resultiert. Die Verschleißraten betragen  $39,4 \pm 4,6 \mu\text{m}^3/10^6$  (C15) sowie  $17,2 \pm 3,6 \mu\text{m}^3/10^6$  (16MnCr5+A) für die metallischen Ritzel und  $266,6 \pm 11,2 \mu\text{m}^3/10^6$  sowie  $124,0 \pm 6,2 \mu\text{m}^3/10^6$  für die Polymerräder.

Bei Verwendung von Ritzeln mit höherer Zahnflankenhärte werden die Verschleißraten deutlich reduziert. Der geringste Verschleiß des Polymerrads wird für die Paarung mit dem 16MnCr5+EH-Ritzel ermittelt, wobei kein signifikanter Verschleiß des Ritzels auftritt. Die Verschleißrate des Polymerrads beträgt lediglich  $62,6 \mu\text{m}^3/10^6$ . Der geringere Verschleiß wirkt sich aufgrund der reduzierten Verlustwärme auch auf die Zahnflankentemperatur aus. Um die zugrundeliegenden Verschleißmechanismen zu identifizieren, wird die Veränderung der Zahnflankenoberfläche in Bild 25 ausgewertet.

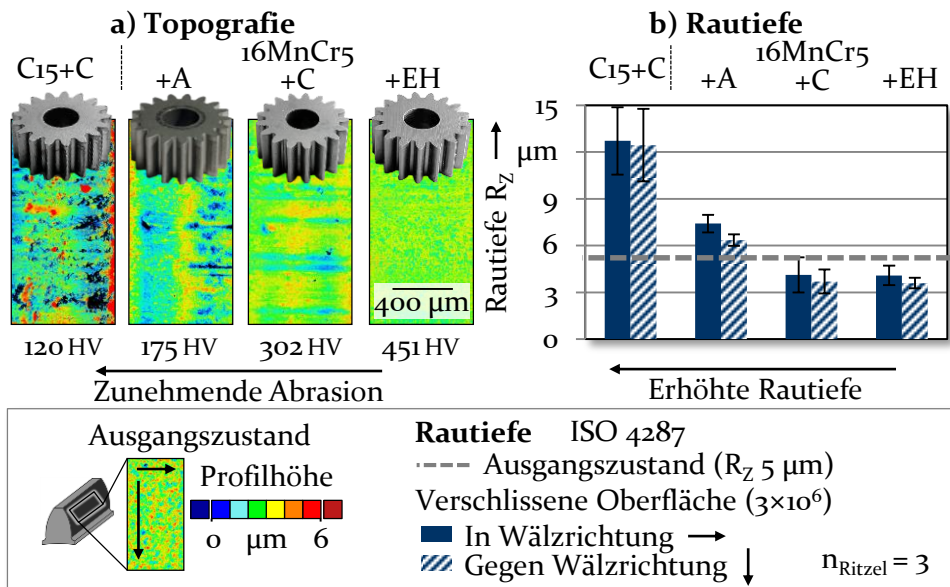


Bild 25: Veränderung der a) Topografie und b) Rautiefe der erodierten Stahlritzel (PA66)

Im Vergleich zur Ausgangsoberfläche ( $R_z = 5 \mu\text{m}$ ) wird die Topografie bei allen Stahlritzeln mit einer Härte von weniger als 300 HV aufgeraut. Dies ist sowohl anhand der Topografie (Bild 25 a) als auch der Rautiefe  $R_z$  (Bild 25 b) ersichtlich. Die mit abnehmender Härte zunehmende Rauheit wird auf abrasiven Verschleiß der metallischen Zahnflanke zurückgeführt. Lediglich bei den einsatzgehärteten Ritzeln (16MnCr5+EH) sind die Rauheitswerte nach den Verschleißversuchen niedriger als im Ausgangszustand. Die Einglättung wird auf das Einebnen von Rauheitsspitzen sowie die Ausbildung eines Transferfilms zurückgeführt, der in Bild 20 bestätigt wurde.

Bei den Stahlritzeln mit geringerer Härte wird aufgrund der Abrasion der Oberfläche keine Ausbildung eines Transferfilms ermöglicht. Die anhand der Ergebnisse identifizierten Verschleißmechanismen bei Einsatz erodierter Stahlritzel sind in Bild 26 zusammengefasst.

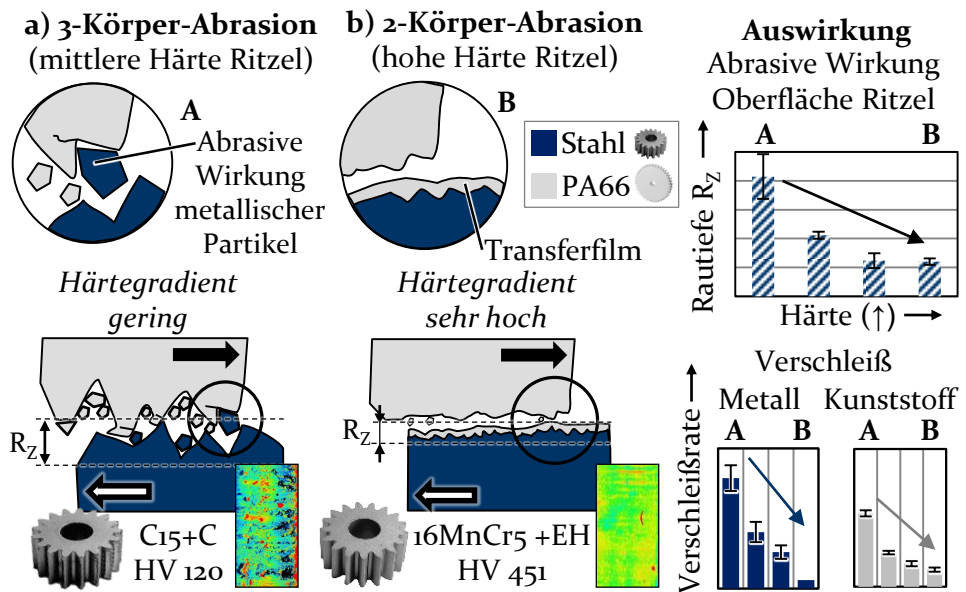


Bild 26: Verschleißmechanismen bei Einsatz der erodierten Stahlritzel (PA66)

Bei geringer Härte (C15, 120 HV) wird die Flankenoberfläche aufgrund der unzureichenden Festigkeit stark aufgeraut und metallische Partikel werden freigesetzt, weshalb hoher metallischer Verschleiß resultiert und im tribologischen System 3-Körper-Abrasion (Bild 26 a) auftritt. Aufgrund der abrasiven Wirkung der rauen Oberfläche und der metallischen Partikel resultiert zudem starker Verschleiß des Polymerrads. Mit zunehmender Härte

wird die Abrasion der Oberfläche reduziert, wodurch der metallische Verschleiß, aber auch die Rautiefe  $R_z$  der Zahnflanke und deren abrasive Wirkung verringert werden (2-Körper-Abrasion). Der Polymerverschleiß nimmt deutlich ab. Bei ausreichender Festigkeit der Oberfläche tritt keine maßgebliche Abrasion mehr auf, sondern es werden lediglich Rauheitsspitzen eingeebnet. Zudem wird die Ausbildung eines verschleißmindernden Transferfilms ermöglicht (Bild 26 b).

### 6.1.2 Aluminium

Nachfolgend wird der Einsatz von Aluminiumritzeln untersucht, die gegenüber Stahl ein geringeres Festigkeitsniveau aufweisen. Bild 27 zeigt den Verschleißverlauf (a) und die stationären Verschleißraten sowie Zahnflankentemperaturen (b).

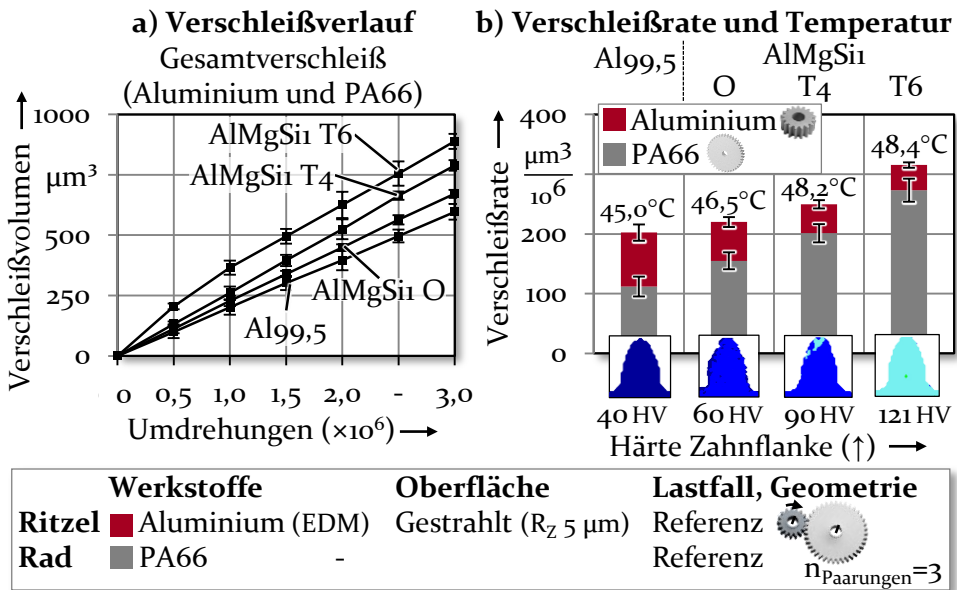


Bild 27: a) Verschleißverlauf und b) stationärer Verschleiß (Aluminium-PA66)

Es zeigt sich für alle Paarungen ein nahezu linearer Verlauf des Gesamtverschleißes (Bild 27 a), wobei das Maximum ( $888,4 \pm 31,5 \mu\text{m}^3$ ) bei Verwendung des Ritzels mit der höchsten Härte (AlMgSi1 T6) auftritt. Mit abnehmender Festigkeit des Ritzels nimmt dieser auf  $612,2 \pm 32,8 \mu\text{m}^3$  für Al99,5 ab. Gegenläufig ist der Einfluss auf den Verschleiß von Ritzel und Rad. Die Verschleißrate des Aluminiumritzels wird mit reduzierter Härte stark erhöht, wohingegen der Verschleiß des Polymerrads abnimmt (Bild 27 b).

Die mittlere Zahnflankentemperatur korreliert mit dem Gesamtverschleiß und erreicht das Maximum bei Einsatz des AlMgSi1 T6. Um die Ursachen des Verschleißverhaltens zu ermitteln, werden in Bild 28 die Topografie und Rautiefe der Zahnflanken ausgewertet.

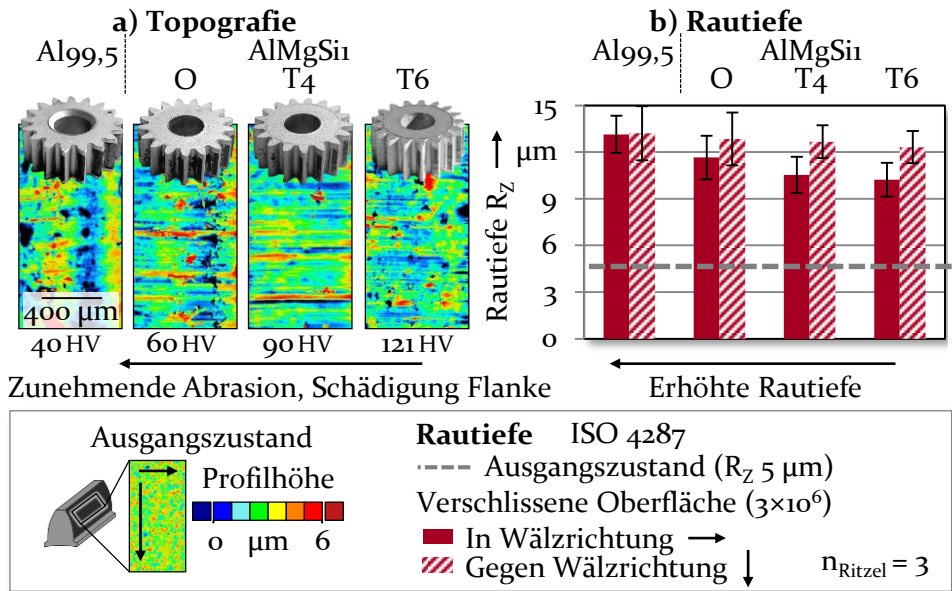


Bild 28: Veränderung der a) Topografie und b) Rautiefe der erodierten Aluminiumritzel (PA 66)

Die Zahnflanken aller Aluminiumritzel werden stark aufgeraut, was auf Abrasion aufgrund der unzureichenden Verschleißfestigkeit zurückgeführt wird. Die gemittelte Rautiefe  $R_z$  liegt bei allen Ritzeln im Bereich von 13,14 bis  $10,23 \pm 1,73$   $\mu\text{m}$  sowohl in als auch entgegen der Wälzrichtung. Mit erhöhter Härte ist anhand reduzierter  $R_z$ -Werte in Wälzrichtung eine zunehmende Vorzugsrichtung der verschlissenen Oberfläche zu erkennen. Dies wird dadurch begründet, dass die Abrasion entlang der Wälzbewegung erfolgt und sich Riefen in Wälzrichtung bilden. Dagegen tritt bei niedriger Härte (Al<sub>99,5</sub> und AlMgSi O) starke Abrasion der metallischen Oberfläche auf, weshalb größere Partikel ausbrechen und eine unregelmäßige Topografie resultiert. Abrasion und Verschleiß der Aluminiumritzel nehmen mit abnehmender Härte zu, und in den Topografiebildern ist eine zunehmende Schädigung der Form der Zahnflanke zu erkennen.

Aufgrund der starken Abrasion und dem Ausbrechen metallischer Partikel tritt bei Einsatz aller Aluminiumwerkstoffe 3-Körper-Abrasion auf und es

wird keine Ausbildung eines Transferfilms ermöglicht. Zwar wird der metallische Verschleiß bei erhöhter Härte reduziert, es brechen allerdings auch im ausscheidungsgehärteten Zustand (T6) weiterhin Partikel aus der Aluminiumoberfläche aus. Gleichzeitig wird bei zunehmender metallischer Härte der Verschleiß des Polymerrads erhöht, was auf die erhöhte abrasive Wirkung der metallischen Partikel zurückgeführt wird. Bild 29 zeigt die Modellvorstellung der auftretenden Verschleißmechanismen.

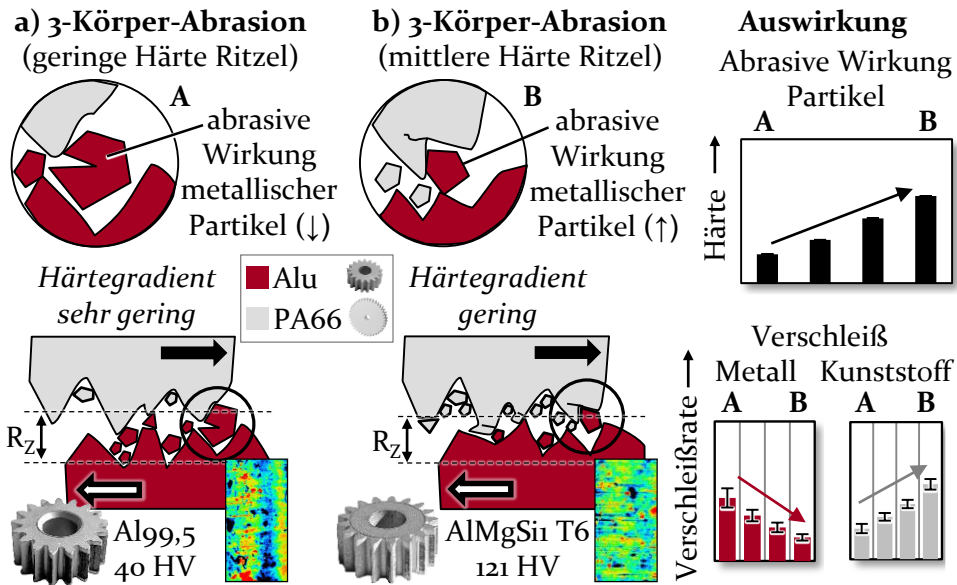


Bild 29: Verschleißmechanismen bei Einsatz der erodierten Aluminiumritzel

Die freiwerdenden metallischen Verschleißpartikel weisen eine abrasive Wirkung im tribologischen System, bestehend aus Metalloberfläche, Polymeroberfläche und Metallpartikeln, auf. Bei reduzierter Härte des Aluminiumwerkstoffs wird die abrasive Wirkung der metallischen Partikel verringert, weshalb der Polymerverschleiß abnimmt (Bild 29 a). Gleichzeitig erhöht sich der Verschleiß des Aluminiumritzels aufgrund der geringeren Verschleißfestigkeit. Der höchste Gesamtverschleiß tritt bei Einsatz des ausscheidungsgehärteten Aluminiumritzels (AlMgSi T6) auf (Bild 29 b), da der Härtegradient und die abrasive Wirkung der metallischen Partikel zunehmen.

### 6.1.3 Messing

Im Folgenden wird der Einsatz von Messing innerhalb der Materialpaarung untersucht. Bild 30 zeigt den Verschleißverlauf (a) und die stationären Verschleißraten sowie Zahnflankentemperaturen (b).

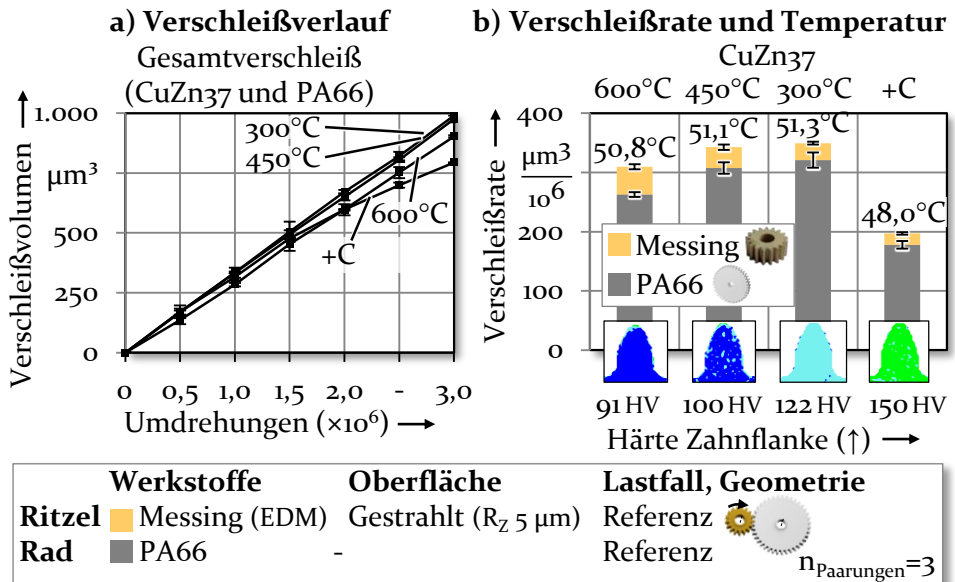


Bild 30: Verschleißverlauf und b) stationärer Verschleiß (Messing-PA66)

Die Paarungen weisen ein sehr ähnliches Verhalten in Bezug auf den Gesamtverschleiß (Bild 30 a) auf. Dieser liegt bei Einsatz der wärmebehandelten Messingritzel zwischen  $902,6 \pm 14,3 \mu\text{m}^3$  (CuZn37 600°) und  $990,0 \pm 15,7 \mu\text{m}^3$  (CuZn37 300°) mit einem weitgehend linearen Verlauf. Lediglich für das CuZn37+C-Ritzel mit höchster Härte ergibt sich ein nichtlinearer Verschleißverlauf mit zunächst hohen und dann reduzierten Verschleißraten. Allerdings folgen wesentliche Unterschiede zwischen den Verschleißraten der Messingritzel und Polymerräder (Bild 30 b). Der maximale Verschleiß am Polymerrad tritt bei einer Härte von 120 HV auf. Dies entspricht den Ergebnissen der Verschleißversuche bei Verwendung von Stahl (C15) und Aluminium (AlMgSi1 T6).

Der metallische Verschleiß nimmt mit zunehmender Härte des Messingwerkstoffs ab. Bild 31 zeigt die Veränderung der Topografie (a) und Rautiefe (b) der Zahnflanken. Wie bei den Untersuchungen zum Einsatz von Stahl und Aluminium festgestellt wurde, kommt es bei einer Zahnflankenhärte im Bereich von 120 HV und darunter zu einer starken Abrasion der Oberfläche, was anhand der Topografiebilder und der erhöhten Rautiefe

sowohl in als auch gegen die Walzrichtung ersichtlich ist. Dies führt zum Auftreten von 3-Körper-Abrasion (vgl. Bild 29), wobei die abrasive Wirkung der metallischen Partikeln mit reduzierter Härte abnimmt und der Verschleiß des Polymerrads verringert wird (Bild 30 b).

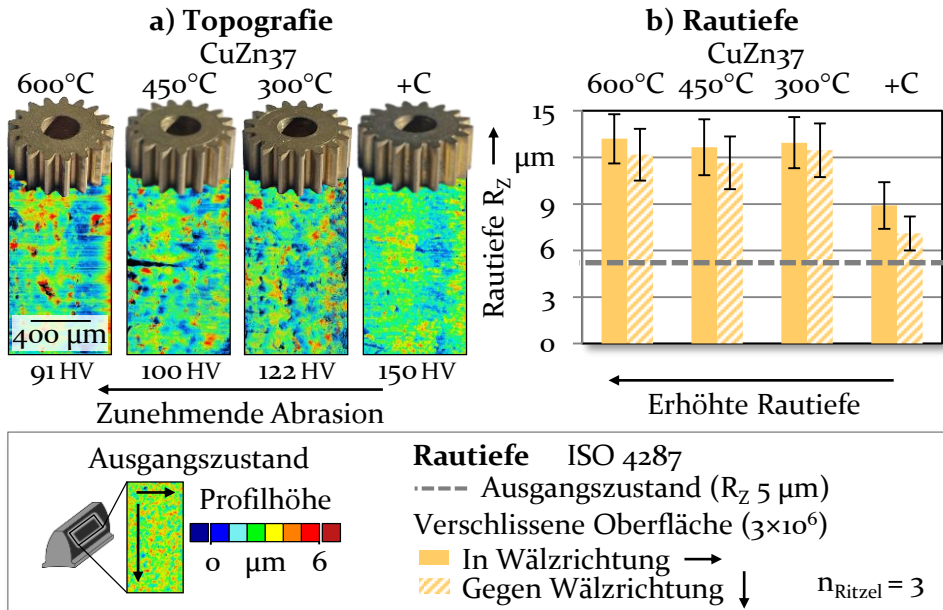


Bild 31: a) Topografie und b) Rautiefe der erodierten Messingritzel (Paarung PA66)

Dagegen ist die Abrasion der Oberfläche beim CuZn37+C-Ritzel (150 HV) aufgrund der erhöhten Verschleißfestigkeit deutlich geringer, was zu einer deutlich niedrigeren Oberflächenrauheit und der Bildung von Riefen in Walzrichtung führt. Zudem brechen keine großen metallischen Partikel aus, weshalb lediglich 2-Körper-Abrasion (vgl. Bild 26) mit deutlich reduzierten Verschleißraten des Polymerrads auftritt. Da jedoch weiterhin Abrasion und Aufrauung der metallischen Oberfläche resultieren, wird keine Ausbildung eines Transferfilms ermöglicht.

### 6.1.4 Kaltverfestigung im Referenzprozess

Die ausscheidungsgehärteten Aluminium- sowie die Messingritzel weisen keine ausreichende Verschleißfestigkeit auf. Vor diesem Hintergrund bietet die gezielte Nutzung der umforminduzierten Verfestigung Potential, wobei bisher jedoch keine Untersuchungen zum Einsatz fließgepresster Zahnräder in der Materialpaarung vorliegen. In Bild 32 sind der Verschleißverlauf (a) und die stationären Verschleißraten (b) bei Einsatz der fließgepressten und erodierten Ritzel dargestellt. Bei allen drei Werkstoffen führt

der Einsatz fließgepresster Ritzel mit erhöhter Härte (Bild 14) zu einem deutlich geringeren Gesamtverschleiß.

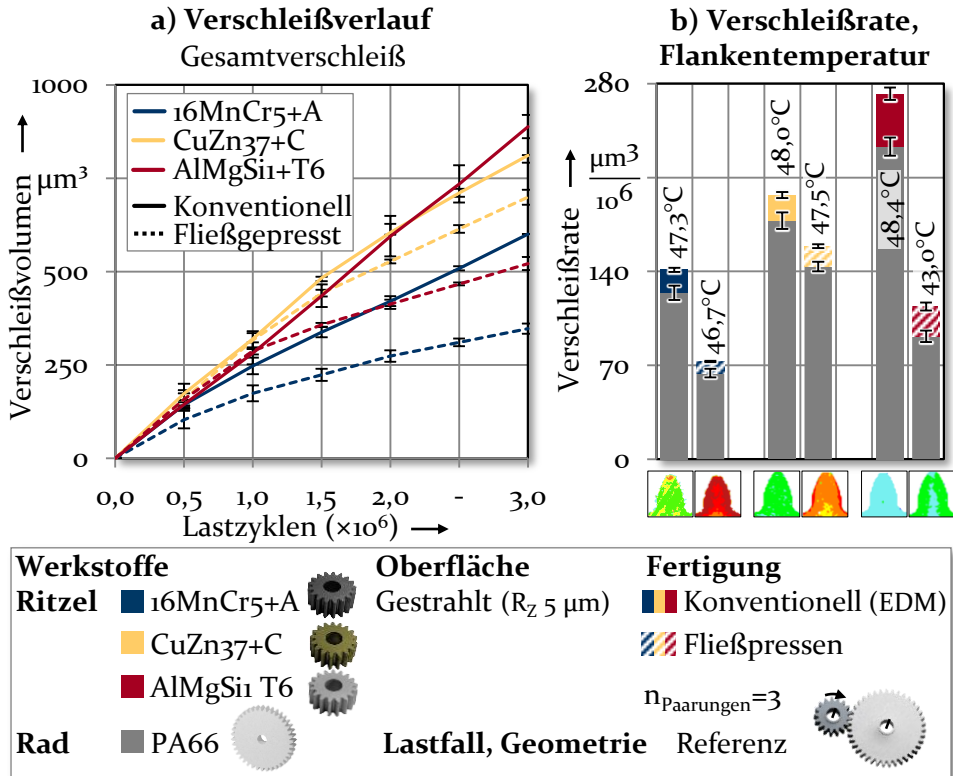


Bild 32: Gegenüberstellung von a) Verschleißverlauf und b) stationärem Verschleiß bei Einsatz von erodierten und im Referenzprozess fließgepressten Ritzeln (Paarung PA66)

Auffällig ist, dass bei den fließgepressten Aluminium- und Messingritzeln ein nichtlinearer Verschleißverlauf mit einer Einlauf- und einer stationären Verschleißphase auftritt (Bild 32 a). Im Gegensatz folgt bei den Paarungen der erodierten Ritzel ein nahezu lineares Verschleißverhalten mit weitgehend konstanten Verschleißraten. Die Auswertung der Verschleißraten (Bild 32 b) zeigt, dass die durch den Umformprozess bedingte Erhöhung der Zahnflankenhärte den Verschleiß beider Zahnräder deutlich reduziert. Die Verschleißraten bei Verwendung von 16MnCr5+A verringern sich auf  $8,6 \pm 0,4 \mu\text{m}^3/10^6$  (50 %) für das Metallritzel bzw.  $91,2 \pm 3,2 \mu\text{m}^3/10^6$  (-26 %) für das Polymerrad. Auch bei Einsatz der fließgepressten Messingritzel nehmen die Verschleißraten von Ritzel und Rad auf  $14,4 \pm 1,5 \mu\text{m}^3/10^6$  (-25 %) sowie  $143,6 \pm 3,6 \mu\text{m}^3/10^6$  (-19 %) ab. Der Rückgang ist bei den fließgepressten Aluminiumzahnrädern mit dem ursprünglich niedrigsten Härteniveau am stärksten ausgeprägt. Die Verschleißraten

werden auf  $22,2 \pm 2,9 \mu\text{m}^3/10^6$  (-35 %) für das Ritzel und  $91,60 \pm 4,6 \mu\text{m}^3/10^6$  (-66 %) für das Polymerrad reduziert. Das verbesserte Verschleißverhalten wird auch durch eine niedrigere mittlere Zahnflankentemperatur bestätigt. Die niedrigste Temperatur tritt beim Einsatz der fließgepressten Aluminiumritzel auf, was auf die hohe Wärmeleitfähigkeit von Aluminium im Vergleich zu Stahl und Messing zurückzuführen ist (Tabelle 3). Um die Ursache für den reduzierten Verschleiß zu ermitteln, wird die Veränderung der Topografie (Bild 33) der metallischen Zahnflanken ausgewertet.

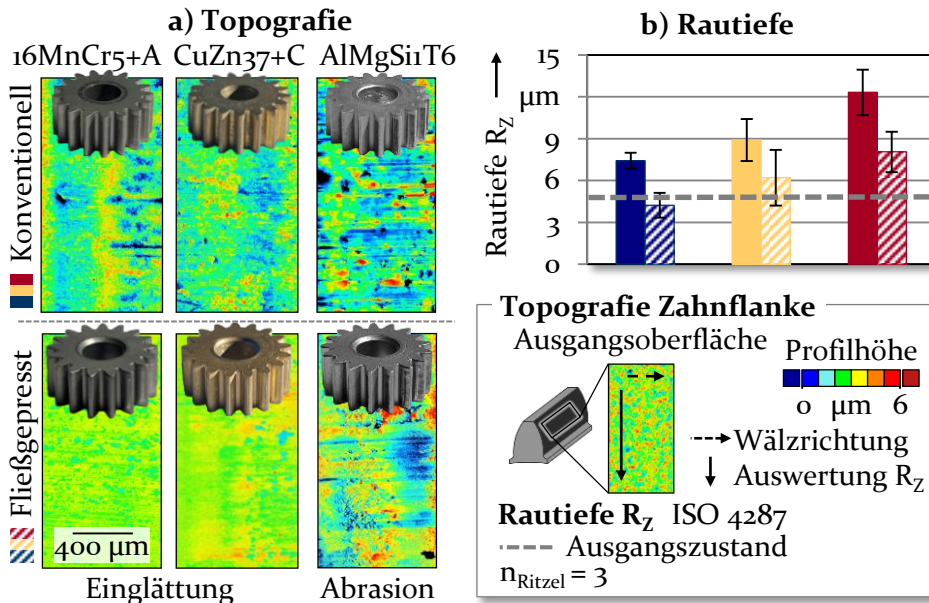


Bild 33: a) Topografie und b) Rautiefe der erodierten und im Referenzprozess fließgepressten Ritzel (Paarung PA66)

Alle erodierten Ritzel sowie die im Referenzprozess fließgepressten AlMgSi1 T6 Ritzel weisen nach den Verschleißversuchen eine erhöhte Rautiefe  $R_z$  auf. Dies ist auf Abrasion der Oberfläche aufgrund unzureichender Verschleißfestigkeit zurückzuführen. Im Gegensatz dazu ist bei den fließgepressten Zahnradern aus Stahl und Messing eine Einglättung der Zahnflanke zu erkennen, die durch den Abbau der initial vorhandenen Rauheitsspitzen verursacht wird. Die reduzierte Rauheit der Oberfläche führt zu einem in Bild 32 identifizierten, nichtlinearen Verschleißverhalten, da die abrasive Wirkung der metallischen Oberfläche reduziert und die Bildung eines verschleißmindernden Transferfilms ermöglicht wird. Zur Bestätigung der Transferfilmbildung wurden EDX-Analysen der fließgepressten Zahnflanken durchgeführt (Bild 34).

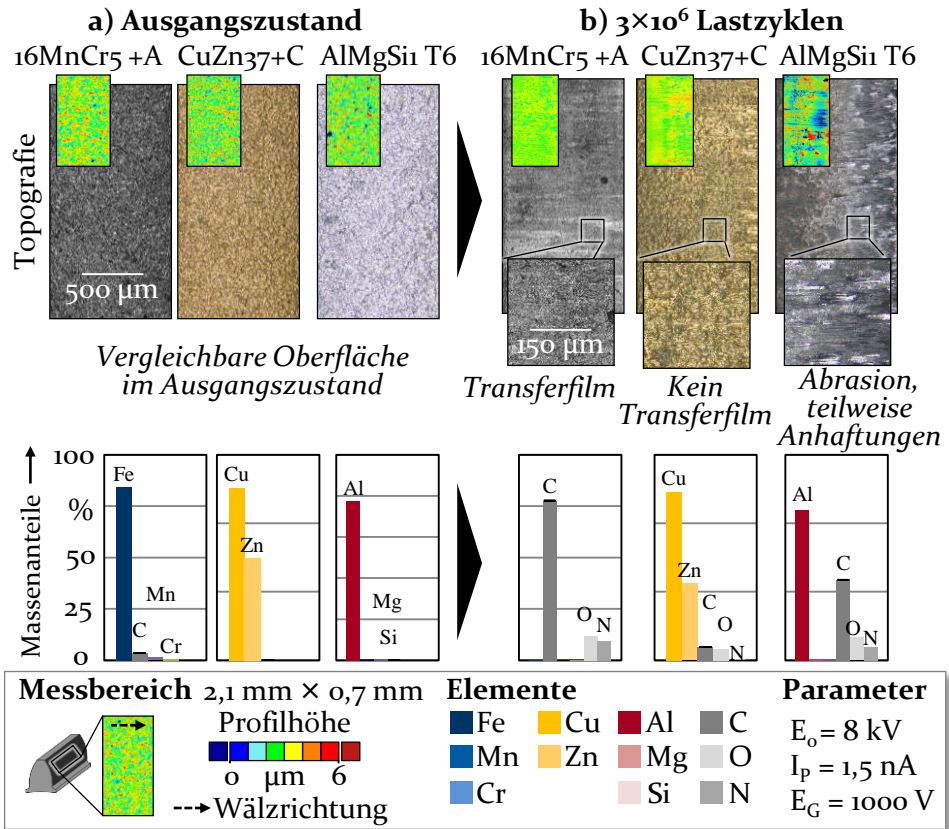


Bild 34: EDX-Analyse der im Referenzprozess fließgepressten Ritzel (Paarung PA66)

Anhand der Messung der verschlissenen Oberflächen (Bild 34 b) wird für 16MnCr+A die Bildung eines Transferfilms durch hohe Kohlenstoff- (77,6 %), Sauerstoff- (11,9 %) und Stickstoff-Massenanteile (9,4 %) bestätigt (Bild 20). Bei den fließgepressten AlMgSi1 T6 Ritzeln kommt es zur bereichsweisen Anhaftung von Polymerwerkstoff (29,3 % Kohlenstoff, 8,3 % Sauerstoff, 4,9 % Stickstoff). Die Auswertung des Mikroskopbildes zeigt jedoch, dass, wie bereits anhand der Topografie (Bild 33) ersichtlich, Abrasion auftritt, wodurch die vollständige Ausbildung eines Transferfilms verhindert wird. Auf der Oberfläche der CuZn37+C-Ritzel wird keine signifikante Anhaftung von Polymerpartikeln (4,8 % Kohlenstoff, 4,0 % Sauerstoff, 0,4 % Stickstoff) und somit keine Bildung eines verschleißmindernden Transferfilms festgestellt, was den erhöhten Verschleiß im Vergleich zum Einsatz der Stahl- und Aluminiumritzel erklärt.

## 6.2 Einfluss der Zahngeometrie auf das Verschleißverhalten

Um die umformtechnische Herstellung zu ermöglichen, ist eine Anpassung der Zahngeometrie durch Kopf- und Fußradien erforderlich [115]. Zudem resultieren prozessbedingte Abweichungen von Zahnprofil- und flanke [188], die größer als bei konventionellen, spanenden Verfahren sind [12]. Im Rahmen von Voruntersuchungen [189] wurde allerdings kein Einfluss eines negativen oder positiven Abmaßes der Zahndicke im Bereich von Qualitätsstufe 6 bis 12 auf das Verschleißverhalten festgestellt, was auf die Unempfindlichkeit von Evolventenverzahnungen gegenüber Achsstandsveränderungen [190] zurückgeführt wird.

Die Zahnradradien wirken sich auf die Länge der aktiven Zahnflanke aus, wodurch die Überdeckung innerhalb der Paarung und die resultierende lokale Beanspruchung der Zahnflanke beeinflusst werden [190]. Es bestehen allerdings unzureichende Erkenntnisse darüber, wie sich die entlang der Zahnflanke variierende Beanspruchung auf den lokalen Verschleiß auswirkt. Im Folgenden wird zunächst der Einfluss des aus der Zahngeometrie der Referenzpaarung resultierenden Eingriffsverhaltens auf die lokale Beanspruchung und den örtlichen Verschleiß der Zahnflanke untersucht. Durch die Kenntnis des Einflusses der lokalen Beanspruchung auf den Verschleiß wird die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Verzahnungsarten sowie Beanspruchungen ermöglicht. Anschließend wird der Einfluss veränderter Zahnradradien auf die Beanspruchung analytisch und auf den Verschleiß experimentell ermittelt.

### 6.2.1 Lokale Beanspruchung und lokaler Verschleiß der Zahnflanke der Referenzgeometrie

Nachfolgend wird für die Referenzgeometrie die lokal entlang der Zahnflanke auftretende Beanspruchung aus Linienlast und spezifischem Gleiten analytisch bestimmt. Anschließend wird die lokale Beanspruchung mit dem experimentell ermittelten Verschleiß abgeglichen.

#### Linienlast

Wie in Abschnitt 2.1 beschrieben (Bild 1), führt das Eingriffsverhalten zu einer Überdeckung von jeweils einem oder zwei Zahnpaaren, wodurch die Linienlast lokal um 50 % reduziert wird. In Bild 35 wird für die Referenzgeometrie anhand der Eingriffspunkte die lokale Linienlast  $F_T(1)$  ermittelt.

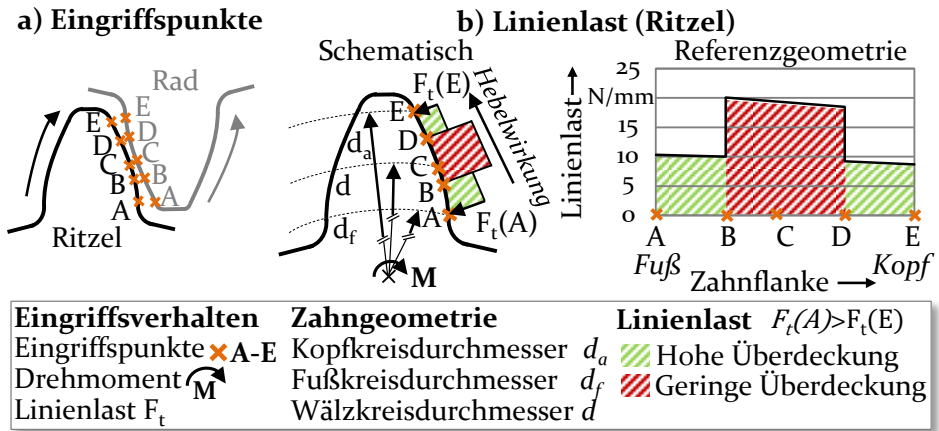


Bild 35: Eingriffspunkte (a) und resultierende Linienlast (b) nach (1)

Wenn zwei Zahnpaare im Eingriff sind (Eingriffspunkte A bis B sowie D bis E), halbiert sich die Linienlast  $F_T$  (1) im Vergleich zu Bereichen, in denen nur ein Zahnpaar im Eingriff ist (B bis D). Für die Referenzgeometrie wird die Linienlast mit einem Maximalwert von 20,6 N/mm auf 10,3 N/mm reduziert (Bild 35 b). Aufgrund der Hebelwirkung durch den zunehmenden Durchmesser nimmt die Last in Richtung Zahnkopf ab.

### Spezifisches Gleiten

Die Gleitbeanspruchung folgt aus einer Relativgeschwindigkeit beider Zahnflanken aufgrund unterschiedlicher Tangentialgeschwindigkeiten. Bild 36 zeigt die Tangentialgeschwindigkeiten und das spezifische Gleiten.

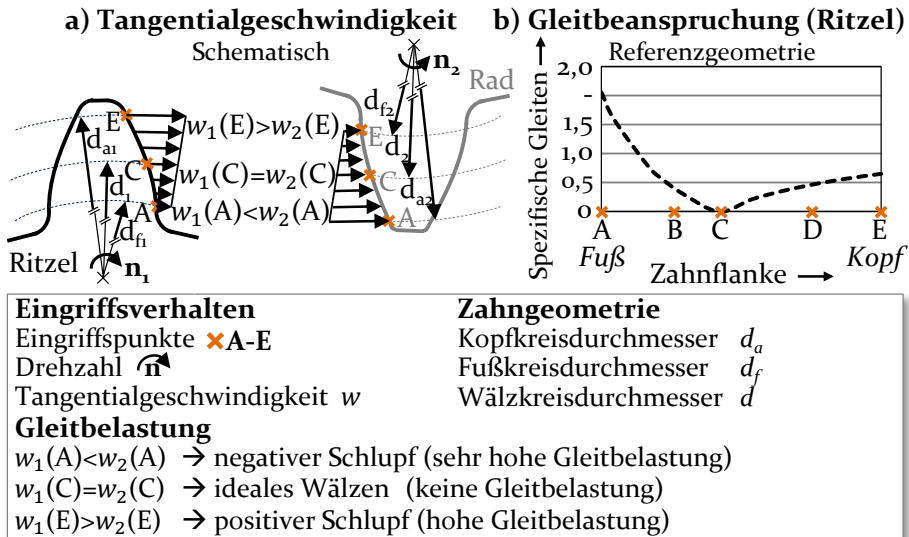


Bild 36: Tangentialgeschwindigkeiten (a) und resultierende Gleitbeanspruchung (b)

Die lokalen Tangentialgeschwindigkeiten  $w_1$  und  $w_2$  (3) steigen aufgrund des zunehmenden Durchmessers entlang der Zahnflanke nach außen hin an (Bild 36 a). Die niedrigste Geschwindigkeit liegt im Zahnfuß und die höchste am Zahnkopf vor. Im Wälzpunkt (C) ist die Geschwindigkeit beider Räder identisch (ideales Wälzen), weshalb die Gleitbelastung dort null beträgt (Bild 36 b). Dagegen nehmen die Relativgeschwindigkeiten beider Zahnräder und somit das spezifische Gleiten  $s$  (5) mit Entfernung vom Wälzpunkt (C) zu. Die höchste Gleitbelastung tritt im Zahnfuß auf, da hier ein kleiner Flankenabschnitt mit geringer Tangentialgeschwindigkeit mit einem großen Flankenabschnitt mit hoher Geschwindigkeit des Gegenrads kämmt, was zu einem negativen Schlupf führt. Im Gegensatz dazu, tritt im Bereich des Zahnkopfes positiver Schlupf auf. Die Belastung der Zahnflanke variiert also lokal deutlich.

### Gegenüberstellung kombinierte Beanspruchung und Verschleiß

In bisherigen Untersuchungen wurden Drehmoment und Drehzahl [41], die die Linienlast und Gleitbeanspruchung beeinflussen [56], als Einflussgrößen auf den globalen Verschleiß identifiziert. Von FEULNER [25] wurde für die Paarung POM-Stahl die Abhängigkeit der Verschleißkoeffizienten von der Linienlast und dem spezifischen Gleiten identifiziert. Der Einfluss einer variierenden Zahngeometrie auf das Eingriffsverhalten, die lokale Beanspruchung sowie den Verschleiß wurde allerdings nicht ermittelt. Im Folgenden wird überprüft, wie sich die lokale Beanspruchung auf den lokalen Verschleiß der Zahnflanke auswirkt. Hierzu wird die kombinierte Beanspruchung  $B_K$  (7) [189] durch eine Multiplikation von Linienlast  $F_T$  (1) und spezifischem Gleiten  $s$  (5) berechnet.

$$B_K = F_T * s = \frac{\left(\frac{2 * T}{d}\right) * 1000}{b} * \frac{v_g}{w(g_y)} \quad (7)$$

Bild 37 zeigt die kombinierte Beanspruchung entlang der Zahnflanke der Referenzgeometrie und stellt diese exemplarisch dem Verschleiß bei Einsatz der erodierten AlMgSi T6 Ritzel gegenüber. Die kombinierte Beanspruchung (Bild 37 a) steigt in Richtung des Zahnfußes aufgrund des zunehmenden spezifischen Gleitens (Bild 36) an. Da im Bereich des Wälzpunktes (C) ideales Wälzen auftritt, ist die Beanspruchung dort minimal und steigt in Richtung des Zahnkopfes wieder an. Die Auswertung des lokalen Verschleißes anhand der Abnahme der Zahndicke (Bild 37 b) zeigt, dass das Verschleißmaximum jeweils im Zahnfuß auftritt, wo aufgrund der

hohen Gleitbeanspruchung die maximale kombinierte Beanspruchung ermittelt wurde. Entsprechend wird der geringste Verschleiß im Bereich des Wälzpunktes (C) bestätigt.

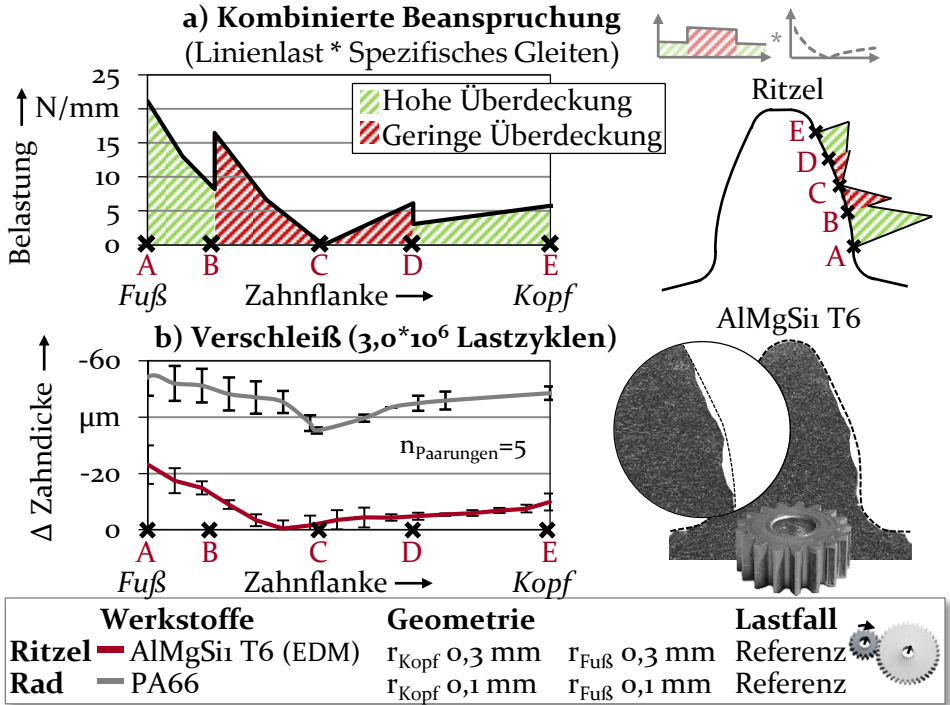


Bild 37: Abgleich lokale Beanspruchung und lokaler Verschleiß (AlMgSi1 T6-PA66)

Der Zusammenhang von kombinierter Beanspruchung und lokalem Verschleiß wurde auch für die sonstigen eingesetzten metallischen Werkstoffe nachgewiesen [189]. Die berechnete kombinierte Beanspruchung stellt sowohl für das Metallritzel als auch für das Polymerrad eine qualitativ gute Vorhersage des lokalen Zahnflankenverschleißes dar. Der Bereich des Zahnfußes wurde aufgrund des aus der hohen Beanspruchung resultierenden Verschleißes als kritisch identifiziert. Die Abnahme der Zahndicke im Zahnfuß beeinträchtigt die Verzahnungsqualität [19] sowie die Bewegungsübertragung und kann zum Zahnbruch führen [191].

### 6.2.2 Zahnradradien

Aufgrund der Abhängigkeit des lokalen Verschleißes von der lokalen Beanspruchung ist durch eine Variation der Zahnradradien und einer resultierenden Veränderung des Eingriffsverhaltens eine Auswirkung auf den Ver-

schleiß zu erwarten. Der Einfluss der Radien des Ritzels auf das Eingriffsverhalten und die lokale Beanspruchung werden analytisch bestimmt. Anschließend wird der Verschleiß bei Variation der Radien experimentell ermittelt. Bild 38 zeigt den Einfluss veränderter Zahnradradien auf die Länge der aktiven Flanke (a) und die Variation im Rahmen der Untersuchungen (b).

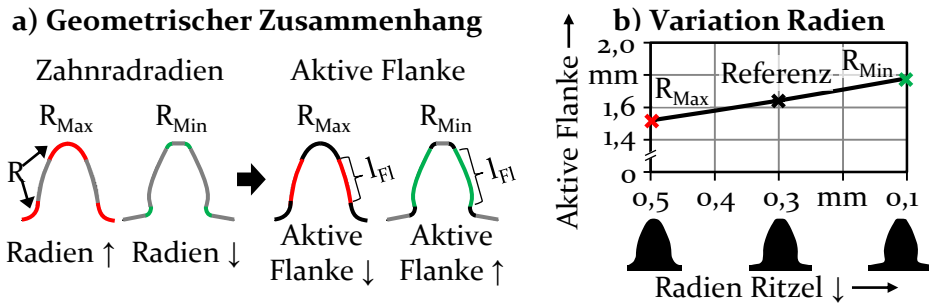


Bild 38: Zusammenhang zwischen Zahnradradien und aktiver Flanke (a) und Variation (b)

Die minimal erforderlichen Radien wurden im Rahmen von Vorarbeiten anhand auftretender kritischer Kerbspannungen in der Fließpressmatrize von mehr als 2.500 MPa identifiziert [115]. Neben der Referenzgeometrie werden minimale Radien ( $R_{Min}$ ) von 0,1 mm, die zum Fließpressen erforderlich sind, sowie konstruktiv maximal mögliche Radien ( $R_{Max}$ ) von 0,5 mm, die durch die Zahngeometrie vorgegeben sind, untersucht. Ein vergrößerter Kopfradius reduziert die Länge der aktiven Flanke des Ritzels. Gegenüber der Länge der aktiven Flanke der Referenz von 1,64 mm wird diese bei maximalen Radien ( $R_{Max}$ ) auf 1,52 mm (-7 %) verkleinert und für minimale Radien ( $R_{Min}$ ) auf 1,78 mm (+9 %) erhöht.

### Verändertes Eingriffsverhalten und Beanspruchung

Die unterschiedlichen Eingriffspunkte wurden mit Hilfe der Verzahnungssoftware KISSsoft (KISSsoft AG) bestimmt und die Beanspruchung der Zahnflanke aus Linienlast und spezifischem Gleiten analytisch ermittelt [189]. In Bild 39 wird das Eingriffsverhalten und die resultierende Beanspruchung der Zahnflanke für den Einsatz maximaler und minimaler Radien des Ritzels gegenübergestellt.

Bei maximalen Radien (Bild 39 a) endet der Eingriff des Zahnkopfes des Ritzels aufgrund der reduzierten Länge der aktiven Flanke früher als bei minimalen Radien (Bild 39 b), wodurch die Überdeckung verringert wird. Dies führt zu einer erhöhten Linienlast im Zahnfußbereich, da das Drehmoment über nur einen Zahn übertragen wird. Dagegen wird die Überdeckung bei minimalen Radien erhöht und die Linienlast reduziert.

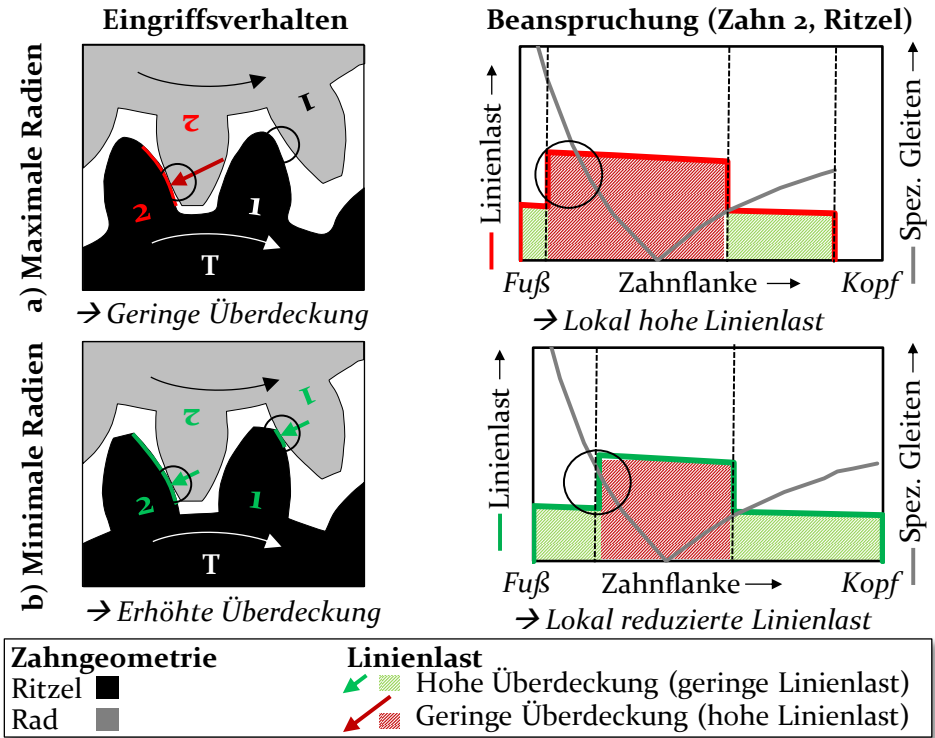


Bild 39: Eingriffsverhalten und Beanspruchung bei maximalen (a) und minimalen (b) Zahnradradien

Da die Gleitbeanspruchung in Richtung des Zahnfußes ansteigt (Bild 36), resultiert bei minimalen Zahnradradien eine lokal hohe Beanspruchung aus Linienlast und spezifischem Gleiten [189]. Bild 40 zeigt die kombinierte Beanspruchung der Zahnflanke des Ritzels bei Variation der Radien.

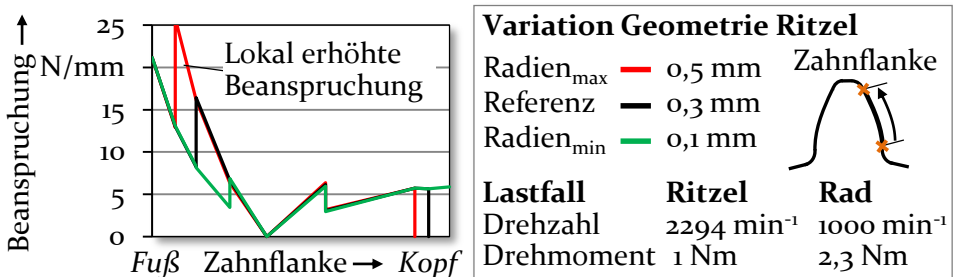


Bild 40: Kombinierte Beanspruchung des Ritzels bei Variation der Zahnradradien

Bei Einsatz des Ritzels mit maximalen Radien beträgt die maximale kombinierte Belastung in diesem Bereich 25,8 N/mm. Bei der Referenz sind es dagegen nur 16,4 N/mm und bei minimalem Radius lediglich 6,9 N/mm.

### Verschleiß der Zahnflanke

Im Folgenden wird das Verschleißverhalten bei Variation der Zahnradradien für eine Paarung mit einem Metallritzel hoher Härte (16MnCr5+EH) sowie eine Paarung mit einem Ritzel geringer Härte (AlMgSi1 T6) untersucht. Hierdurch wird die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf den Einsatz verschiedener Metallwerkstoffe geprüft. Bild 41 zeigt die Verschleißrate und die lokale Abnahme der Zahndicke.

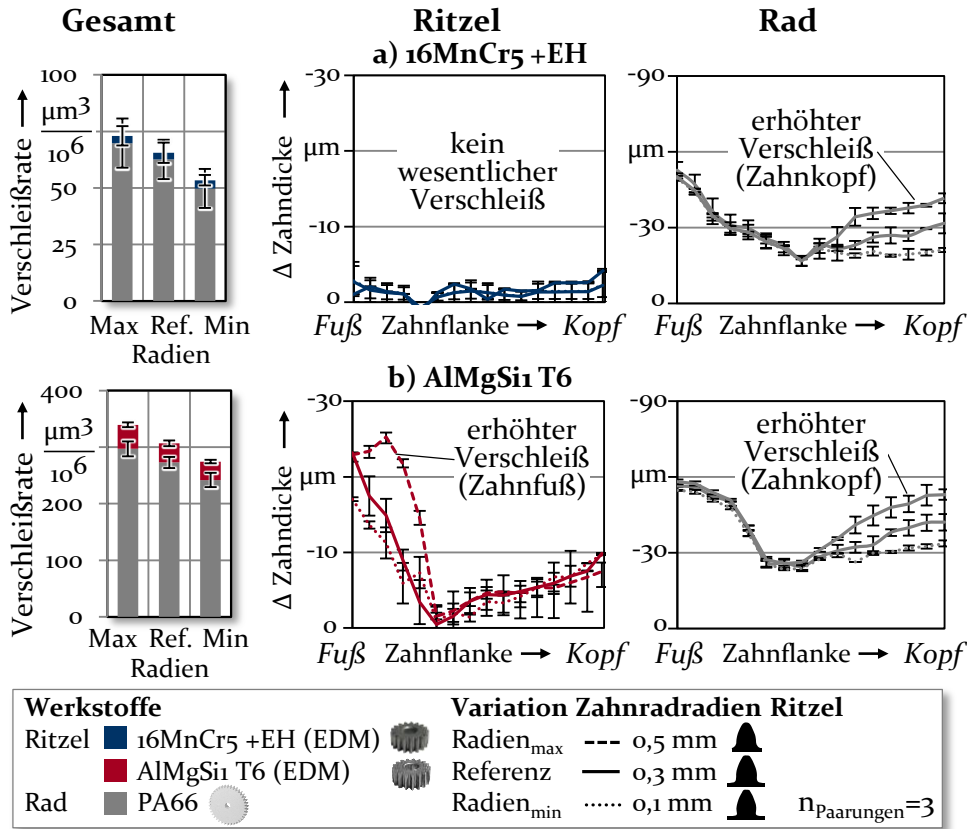


Bild 41: Verschleiß bei Variation der Zahnradradien: 16MnCr5+EH (a) und AlMgSi1 T6 (b) (Paarung PA66)

Beim einsatzgehärteten Ritzel 16MnCr5+EH (Bild 41 a) tritt kein Verschleiß des Metallritzels auf, wohingegen die Verschleißraten der Polymerräder in Abhängigkeit der Radien lokal deutlich variieren. Diese nehmen von  $62,6 \pm 8,66 \mu\text{m}^3/10^6$  für die Referenz auf  $69,8 \pm 10,80 \mu\text{m}^3/10^6$  ( $R_{\text{Max}}$ ) zu, sowie auf  $49,7 \pm 8,59 \mu\text{m}^3/10^6$  ( $R_{\text{min}}$ ) ab. Der Einfluss der Radien auf den Verschleiß ist ebenfalls für die Paarung mit dem AlMgSi1 T6 Ritzel (Bild 41 b) zu erkennen. Die Gesamtverschleißrate der Paarung wird

gegenüber dem Einsatz der Referenzgeometrie bei minimalen Radien auf  $274,4 \pm 12,74 \mu\text{m}$  (-11 %) verringert.

Die Auswertung der lokalen Abnahme der Zahndicke mittels KMG (Bild 41 b) zeigt, dass das reduzierte Verschleißvolumen bei minimalen Radien durch einen verringerten Verschleiß im Zahnfußbereich des Ritzels sowie im Kopfbereich des Rads bedingt wird. Der im Zahnfußbereich reduzierte Verschleiß bei verkleinerten Radien ist auch anhand der Schlifffbilder (Bild 42) der AlMgSi1 T6 Ritzel zu erkennen.

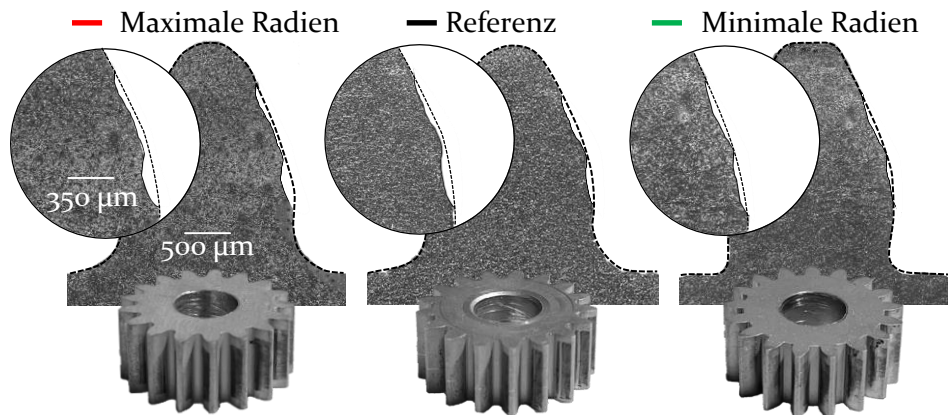


Bild 42: Verschlossene Zahnkontur bei Variation der Zahnradradien (AlMgSi1 T6-PA66)

Der veränderte lokale Verschleiß ist auf die in Bild 40 ermittelte variierende Beanspruchung infolge des durch die Zahnradradien beeinflussten Eingriffsverhaltens (Bild 39) zurückzuführen. Der Verschleiß im versagenskritischen Zahnfußbereich [191] wird bei kleineren Radien reduziert. Die Auslegung der Zahnradradien muss somit nicht nur unter Berücksichtigung der Auswirkungen auf den Fließpressprozess, sondern auch hinsichtlich des Verschleißverhaltens erfolgen.

### 6.3 Zusammenfassung der identifizierten Verschleißmechanismen

Im Folgenden werden funktionale Zusammenhänge aus den vorangegangenen Untersuchungen erarbeitet und die identifizierten Verschleißmechanismen zusammengefasst. Der Einfluss der Vorzugsrichtung und Rautiefe der metallischen Oberfläche wurde im Rahmen der Voruntersuchungen in Abschnitt 5.2.3 ermittelt (Bild 23). Bei unzureichender Festigkeit der metallischen Zahnflanke tritt allerdings Abrasion der Oberfläche auf, weshalb die initiale Topografie das Verschleißverhalten nicht beeinflusst. In

Abhängigkeit von Werkstoff und Zahnflankenhärte resultieren verschiedene abrasive Verschleißmechanismen, die sich unterschiedlich auf den Verschleiß des Metallritzels und des Polymerrads auswirken.

Zunächst werden funktionale Zusammenhänge zwischen dem Werkstoff sowie der Zahnflankenhärte und dem resultierenden Verschleißverhalten abgeleitet, wobei die Veränderung der Oberflächenrauheit, der Verschleiß und die Zahnflankentemperatur ausgewertet werden. Da in Abschnitt 6.1 die verschleißbedingte Zahnflankentopografie als maßgeblich für die auftretenden Verschleißmechanismen identifiziert wurde, wird in Bild 43 der Einfluss der Zahnflankenhärte auf die Veränderung der Rauheit der metallischen Zahnflanke zusammengefasst.

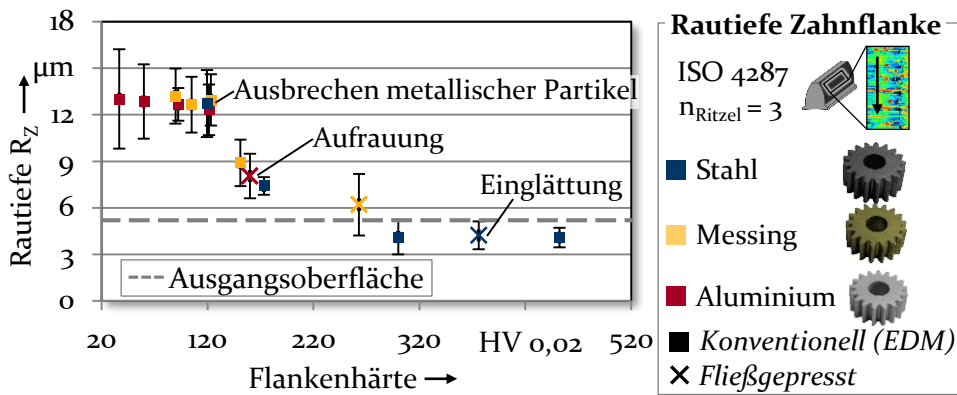


Bild 43: Veränderung der Rauheit der metallischen Zahnflanke in Abhängigkeit der Härte (Paarung PA66)

Bei allen drei Werkstoffen ist mit abnehmender Härte eine zunehmende Aufrauung der Oberfläche gegenüber dem Ausgangszustand ( $R_z = 5 \mu\text{m}$ ) festzustellen. Dies ist auf Abrasion der Metalloberfläche aufgrund einer unzureichenden Verschleißfestigkeit zurückzuführen. Bei einer Härte  $\leq 120 \text{ HV}$  tritt hoher metallischer Verschleiß auf, der zum Ausbrechen metallischer Verschleißpartikel führt. Der metallische Verschleiß nimmt mit abnehmender Härte weiter zu, wobei die Oberflächenrauheit in einem Bereich von  $R_z = 11,7 \mu\text{m}$  bis zu  $13,3 \pm 1,8 \mu\text{m}$  weitgehend konstant bleibt, jedoch eine erhöhte Streuung der Rauheitswerte festzustellen ist. Dies wird durch das Ausbrechen großer Verschleißpartikeln erklärt.

Mit zunehmender Zahnflankenhärte nimmt die Aufrauung der Oberfläche durch Abrasion aufgrund der erhöhten Festigkeit kontinuierlich ab. Bei den erodierten Ritzeln aus Stahl mit reduzierter Festigkeit (16MnCr5+A) sowie bei den im Referenzprozess fließgepressten Messing- und Alumini-

umritzeln tritt jedoch weiterhin eine Aufrauung gegenüber dem Ausgangszustand auf. Eine ausreichende Verschleißfestigkeit der metallischen Zahnflanke, die eine Aufrauung der Oberfläche verhindert und die Einglättung infolge der Transferfilmbildung ermöglicht, wird nur bei den fließgepressten und einsatzgehärteten Stahlritzeln erreicht.

In Bild 44 ist der Einfluss von Werkstoff sowie Zahnflankenhärte des metallischen Ritzels auf den Verschleiß des Metallritzels (a) und des Polymerrads (b) dargestellt. Zudem werden die auftretenden Verschleißmechanismen zugeordnet, die in Bild 45 zusammengefasst sind.

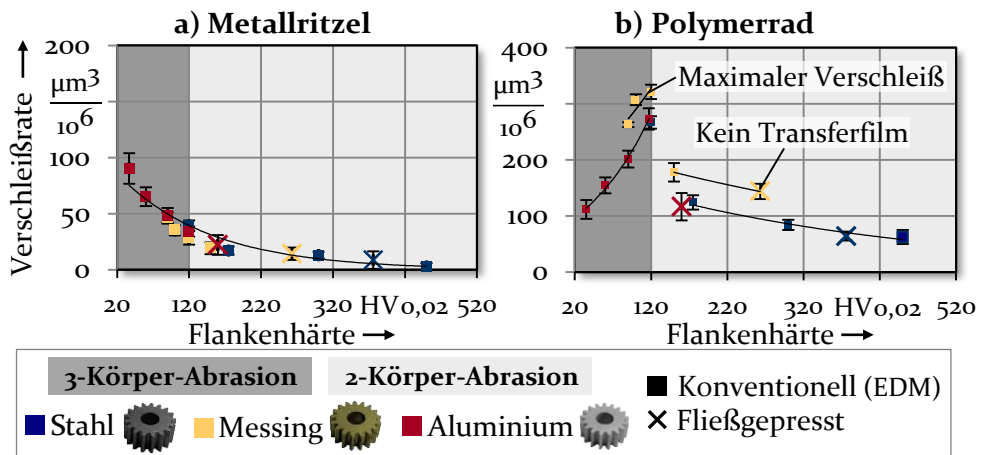


Bild 44: Einfluss von Metallwerkstoff und Flankenhärte auf den Verschleiß

Die metallischen Werkstoffe zeigen ein vergleichbares Verschleißverhalten in Abhängigkeit der Zahnflankenhärte (Bild 44 a) auf. Mit zunehmender Härte nimmt die Verschleißrate kontinuierlich ab, was auf eine erhöhte Verschleißfestigkeit gegen Abrasion zurückgeführt und durch die reduzierte Rautiefe der Oberfläche belegt wird (Bild 43). Lediglich bei einer Härte  $\leq 120$  HV tritt substantieller Verschleiß des Metallritzels mit Verschleißraten  $> 35 \mu\text{m}^3/10^6$  auf.

Die metallische Zahnflankenhärte wirkt sich zudem wesentlich auf den Verschleiß der Polymerräder (Bild 44 b) aus. Maximaler Verschleiß des Polymerrads tritt bei einem Härteniveau des Metallritzels von 120 HV auf, was bei Einsatz aller drei Metallwerkstoffe bestätigt wird. Dies wird auf das Auftreten von 3-Körper-Abrasion (Bild 45 a) - zwischen der Metalloberfläche, den metallischen Partikeln und der Polymeroberfläche - infolge der freiwerdenden Verschleißpartikel zurückgeführt. Die metallischen Partikel weisen aufgrund des hohen Härtegradienten eine starke abrasive Wirkung auf das Polymerrad auf. Mit abnehmender Härte

der Partikel wird der Härtegradient und die resultierende abrasive Wirkung reduziert, weshalb der Verschleiß des Polymerrads bei einer Härte des Metallritzels < 120 HV deutlich abnimmt.

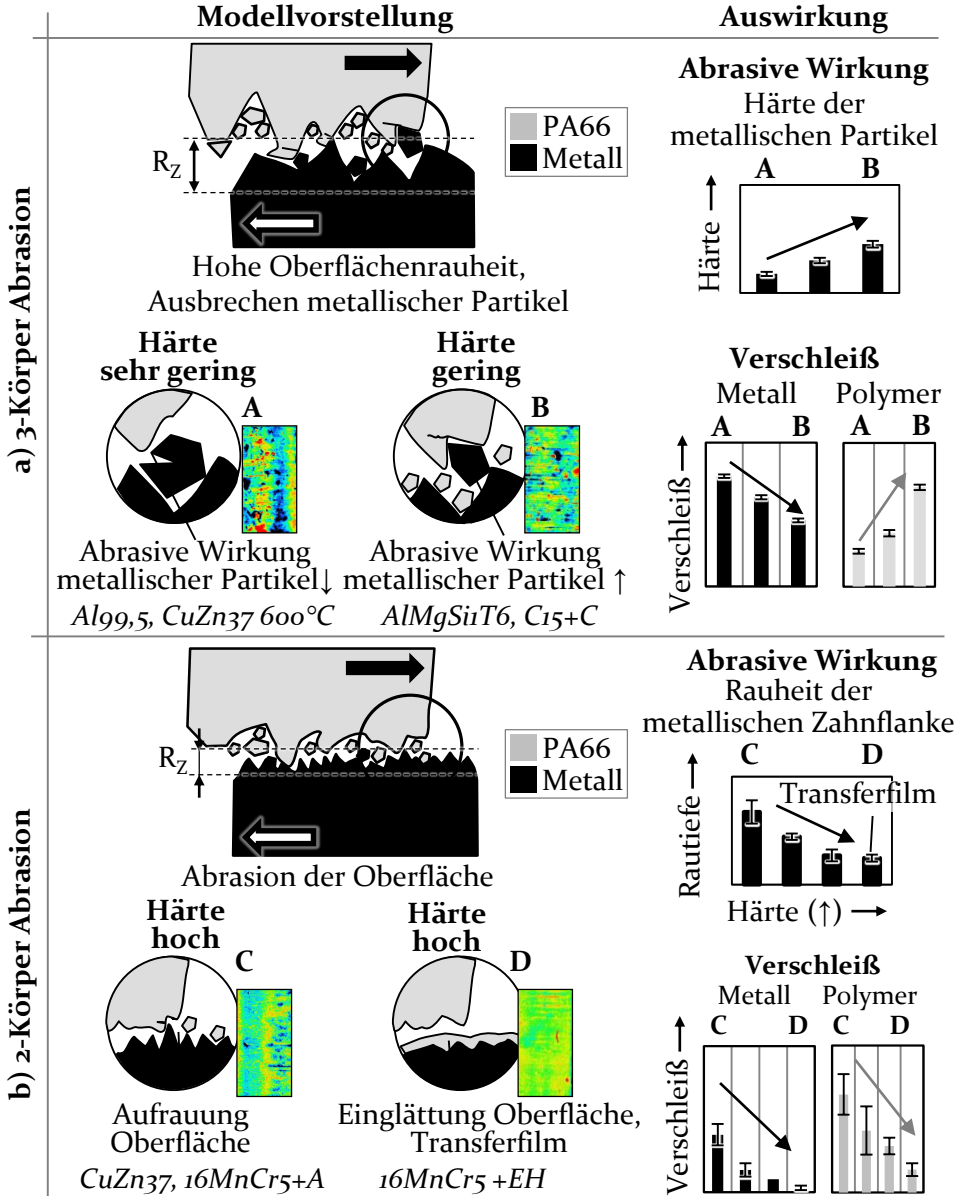


Bild 45: Zusammenfassung der identifizierten abrasiven Verschleißmechanismen

Bei einer Erhöhung der Härte der metallischen Oberfläche auf mehr als 120 HV wird der Verschleiß ebenfalls reduziert, was durch eine verringerte

Menge freigesetzter metallischer Verschleißpartikel (Bild 44 a) bedingt wird. Bei zunehmender Härte tritt kein substantieller metallischer Verschleiß mehr auf, sondern lediglich eine Aufrauung der Oberfläche (Bild 43). Aufgrund der abrasiven Wirkung der aufgerauten Oberfläche kommt es zur 2-Körper-Abrasion (Bild 45 b) zwischen Metallritzel und dem Polymerrad. Bei erhöhter Härte werden die Aufrauung und die abrasive Wirkung der Oberfläche reduziert, weshalb auch der Verschleiß des Polymerrads weiter abnimmt. Zudem wird bei ausreichender Festigkeit und tribologischer Kompatibilität der Werkstoffe die Ausbildung eines verschleißmindernden Transferfilms ermöglicht, der bei Einsatz der fließgepressten und einatzgehärteten 16MnCr5 Ritzel nachgewiesen wurde. Dagegen wurde bei Anwendung der fließgepressten AlMgSi1 T6 und CuZn37+C-Ritzel eine Aufrauung der Oberfläche und keine Transferfilmbildung festgestellt, weshalb eine weitere Erhöhung der Zahnflankenhärte erforderlich ist.

Die Auswertung der Zahnflankentemperatur des Polymerrads (Bild 46), die Aufschluss über die infolge Verschleiß entstehende Verlustwärme in der Paarung gibt, bestätigt die identifizierten Zusammenhänge. Maximale Temperaturen von  $48,4\text{ °C}$  bis  $51,68 \pm 1,1\text{ °C}$  resultieren bei allen Materialpaarungen bei einer Härte des Metallritzels von etwa 120 HV, wodurch das in Bild 44 identifizierte Verschleißmaximum bestätigt wird.

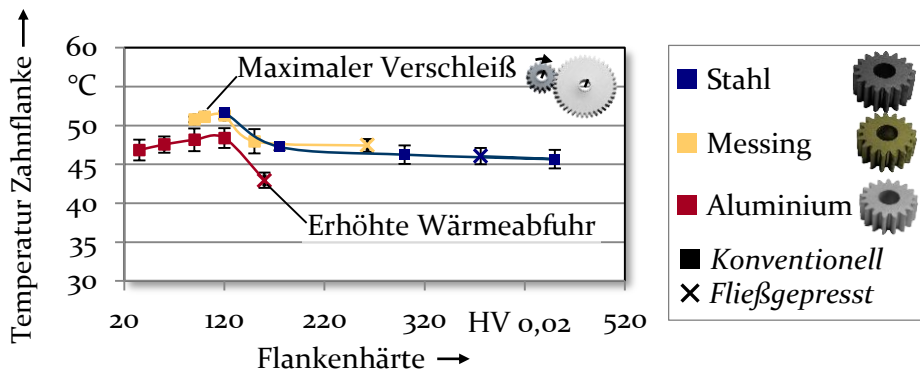


Bild 46: Einfluss von Metallwerkstoff und Härte auf die Verlustwärme in der Paarung

Die maximale Temperatur der Zahnflanke des Polymerrads liegt deutlich unterhalb der Glasübergangstemperatur von PA66 von  $70\text{ °C}$  und der dauerhaften Einsatztemperatur von  $80\text{--}100\text{ °C}$  [192], weshalb die ermittelten Verschleißraten auch auf den Dauerbetrieb übertragbar sind. Die niedrigsten Zahnflankentemperaturen ergeben sich bei einer hohen Härte des metallischen Ritzels, was durch den reduzierten Verschleiß und die verringerte Verlustwärme begründet wird. Insgesamt weisen die Paarungen mit

den Aluminiumritzeln ein geringeres Temperaturniveau auf, was auf die erhöhte Wärmeleitfähigkeit gegenüber Stahl und Messing zurückzuführen ist (Tabelle 3). Der Einsatz von Aluminium führt somit zum niedrigsten Temperaturniveau aller untersuchten Paarungen und bietet das Potential, die Lebensdauer des Polymerrads zu verlängern, da bei hohen Temperaturen eine Abnahme der mechanischen Eigenschaften folgt [8].

Die Untersuchungen zeigen, dass bei Einsatz der Aluminium- und Stahlwerkstoffe ein vergleichbares Verschleißverhalten der Paarung in Abhängigkeit der Zahnflankenhärte resultiert. Dies wurde durch die Untersuchungen der im Fließpressprozess kaltverfestigten Aluminiumritzel mit erhöhter Härte nachgewiesen. Aufgrund des reduzierten Festigkeitsniveaus konventionell hergestellter Aluminiumzahnräder tritt bei Einsatz dieser jedoch 3-Körper-Abrasion auf, weshalb bei abnehmender Härte eine Zunahme des metallischen und eine Reduktion des Polymerverschleißes folgen. Dies erklärt die gegensätzlichen Ergebnisse bisheriger Untersuchungen von Aluminium in der Paarung mit Polyamid, in denen von CHEN ET AL. [51] ein reduzierter und von TAKAHASHI ET AL. [50] ein erhöhter Verschleiß gegenüber dem Einsatz von Stahl mit höherer Festigkeit festgestellt wurde.

Im Kapitel 6 wurde durch die systematische Untersuchung des Einflusses von Werkstoff und Härte sowie die Identifikation der Verschleißmechanismen ein tiefgehendes Verständnis der Einflussgrößen auf den Verschleiß der Materialpaarung geschaffen. Die Nutzung der umforminduzierten Verfestigung ist geeignet, das Einsatzpotential von Aluminium- und Messingritzeln zu erweitern. Allerdings weisen diese in der Paarung mit Polyamid gegenüber Stahl weiterhin eine unzureichende Festigkeit auf, weshalb Abrasion der Zahnflankenoberfläche auftritt und keine Ausbildung eines verschleißmindernden Transferfilms möglich ist. Vor diesem Hintergrund ist eine gezielte Erhöhung der umforminduzierten Verfestigung vielversprechend, um den Verschleiß weiter zu reduzieren und die Substitution von Stahlritzel durch Aluminium bei gleicher Lebensdauer zu ermöglichen.

## 7 Erarbeitung von Methoden zur betriebsangepassten Herstellung metallischer Verzahnungen

In den Kapiteln 5 und 6 wurden Einflüsse der metallischen Verzahnung auf das Verschleißverhalten identifiziert. Beim Fließpressen einsatzfertiger Zahnräder bestehen allerdings noch wesentliche Herausforderungen, die im Folgenden beschrieben werden. Auf dieser Grundlage wird der Bedarf zur Erweiterung des Prozessverständnisses abgeleitet. Anschließend werden mit Hilfe des validierten numerischen Prozessmodells der Einfluss halbzeugseitiger Größen auf die einsatzrelevanten Prozess- und Bauteileigenschaften ermittelt und Maßnahmen zur gezielten Beeinflussung der einsatzrelevanten Bauteileigenschaften erarbeitet.

### 7.1 Herausforderungen bei der Herstellung einsatzfertiger Verzahnungen

Im Folgenden werden Herausforderungen bei der Herstellung einsatzfertiger Verzahnungen durch Fließpressen identifiziert. Diese betreffen die Formfüllung und Verfestigung bei der Umformung von Werkstoffen im vorverfestigten Materialzustand wie AlMgSi1 T6 sowie die begrenzte Verzahnungsgenauigkeit (Bild 50).

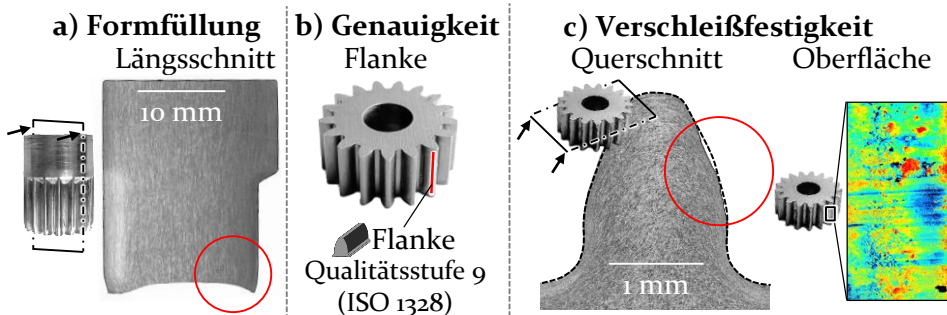


Bild 47: Herausforderungen beim Fließpressen von Zahnrädern aus AlMgSi1 T6

Wie in Abschnitt 5.1 festgestellt, variiert die erzielbare Formfüllung beim Fließpressen unterschiedlicher Werkstoffe wesentlich. Es resultiert eine reduzierte Formfüllung bei Umformung von Aluminium im vorverfestigten Materialzustand aufgrund eines Materialeinzuges in der Bauteilmitte und

eines Vorseilens des Stoffflusses im Randbereich. Zudem folgt eine reduzierte Genauigkeit der Flankenlinie, wodurch die erzielbare Qualitätsstufe der Verzahnung begrenzt wird. Weiterhin weisen die aus AlMgSi1 T6 fließgepressten Verzahnungen eine unzureichende Verschleißfestigkeit auf (Bild 33). Dies wird neben der geringen Festigkeit im Ausgangszustand auch auf das reduzierte Verfestigungspotential aufgrund des bereits vorverfestigten Materialzustandes zurückgeführt.

### 7.1.1 Einflüsse auf die Verzahnungsgenauigkeit

Nachfolgend werden, anhand der im Referenzprozess hergestellten Zahnräder, Einflüsse auf die Verzahnungsgenauigkeit beschrieben. Berücksichtigt wird die Genauigkeit der Profil- und Flankenlinie.

#### Matrizenauflfederung

Die Profilabweichungen sind auf die elastische Verformung der Matrize während der Umformung zurückzuführen. Der beim Fließpressen resultierende Innendruck führt zu einer radialen Verschiebung des Verzahnungsprofils der Matrize nach außen und einem Übermaß der umgeformten Zahngeometrie. Bild 48 zeigt den Einfluss der numerisch ermittelten Matrizenauflfederung (a) auf die Profilabweichungen (b) bei Umformung der verschiedenen Zahnradwerkstoffe.

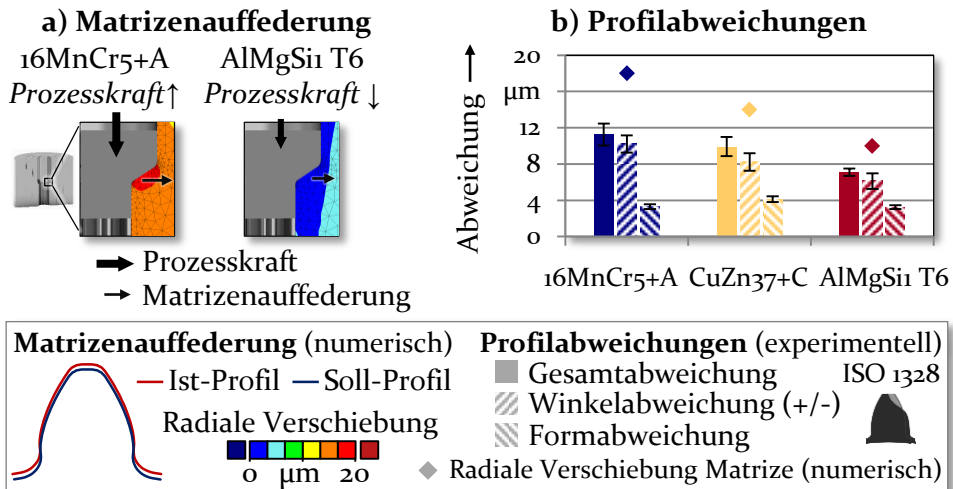


Bild 48: Einfluss der Prozesskraft auf Matrizenauflfederung (a) und Profilabweichungen (b)

Die unterschiedlichen Profilabweichungen werden durch abweichende Prozesskräfte bedingt. Die maximale Prozesskraft und radiale Aufweitung

des Matrizenprofils resultieren bei Umformung des Stahlwerkstoffs 16MnCr5+A (radiale Verschiebung 18  $\mu\text{m}$ ), wohingegen die Kräfte und die elastischen Verschiebungen bei CuZn37+C (14  $\mu\text{m}$ ) und AlMgSi1 T6 (10  $\mu\text{m}$ ) deutlich geringer sind (Bild 48 a). Der Einfluss der Auffederung auf die experimentell ermittelten Profilabweichungen wird in Bild 48 b überprüft. Die Profil-Winkelabweichung zeigt aufgrund des positiven Vorzeichens eine Verschiebung der Winkellage der Evolvente nach außen und damit ein Materialübermaß an. Eine reduzierte radiale, elastische Aufweitung der Fließpressmatrize wirkt sich positiv auf die erreichbare Genauigkeit des Zahnprofils aus, da das Materialübermaß der Zahnflanke und somit die Profil-Winkelabweichungen deutlich reduziert werden. Die Profil-Formabweichung, die Abweichungen der Form der Evolvente ohne Berücksichtigung der Winkellage wiedergibt, wird dagegen durch die Auffederung nicht beeinflusst.

### Formfüllung

Die Flankenlinienabweichungen resultieren aus einer ungleichmäßigen Formfüllung über die Zahnbreite. Diese wird durch die Bildung des Einzugsbereichs bedingt (Bild 49 a), der zu einem Materialdefizit im unteren und einem Übermaß im oberen Bereich der Verzahnung führt. Gegenüber dem Stahlwerkstoff nimmt die Einzugsgröße für Messing und Aluminium zu. Die reduzierte Formfüllung bewirkt einen Anstieg der Flankenlinienabweichungen (Bild 49 b).

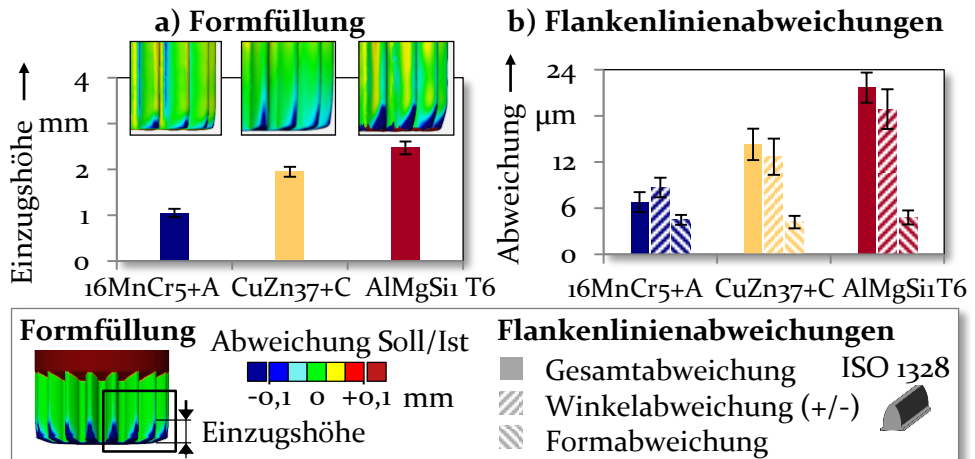


Bild 49: Einfluss der Formfüllung (a) auf die Flankenlinienabweichung (b)

Die Auswertung der Flankenlinien-Winkelabweichung, die ein positives Vorzeichen aufweist, bestätigt, dass eine Zunahme des Zahnradurchmes-

sers entlang der Flankenlinie von unten nach oben infolge des Materialdefizits im Einzugsbereich vorliegt. Das Materialdefizit und die Winkelabweichungen werden bei Umformung von CuZn<sub>37</sub>+C und AlMgSi<sub>1</sub> T6 gegenüber 16MnCr<sub>5</sub>+A deutlich vergrößert, weshalb die Flankenlinien-Gesamtabweichung erhöht wird. Auf die Flankenlinien-Formabweichung wirkt sich der Einzugsbereich nicht negativ aus.

Vor dem Hintergrund des Übertragungsverhaltens der Zahnradpaarung ist die Berücksichtigung der erzielbaren Verzahnungsgenauigkeit erforderlich [20]. In Abhängigkeit der Anforderungen wird eine Qualität der metallischen Verzahnung der Stufe 6 bis 10 gefordert [22]. Die Mindestanforderung wird im Fließpressprozess für alle Werkstoffe erreicht, weshalb die Zahnräder grundsätzlich einsatzfertig herstellbar sind. Allerdings resultiert bei Umformung von AlMgSi<sub>1</sub> T6 lediglich Stufe 9, weshalb bei hohen Anforderungen eine Steigerung der Verzahnungsqualität erforderlich ist. Die Abweichungen von Profil und Flankenlinie werden maßgeblich durch die Matrizenauflfederung (Bild 48 a) und durch den prozessbedingten Einzug (Bild 49 a) beeinflusst. Vor diesem Hintergrund kommen der Reduzierung der erforderlichen Prozesskräfte und der Verbesserung der Formfüllung eine entscheidende Bedeutung zu.

### 7.1.2 Bedarf zur Erweiterung des Prozessverständnisses

Um die betriebsangepasste Herstellung einsatzfertiger Verzahnungen durch Fließpressen zu ermöglichen, ist eine Erweiterung des Prozessverständnisses erforderlich. Zum einen sind die Einflüsse halbzeugeitiger Größen wie der Fließeigenschaften des Zahnradwerkstoffs und der geometrischen Genauigkeit des Rohlings zu ermitteln. Zum anderen sind werkzeugseitige Maßnahmen zur gezielten Beeinflussung der Formfüllung sowie der lokalen Verfestigung zu erarbeiten (Bild 50).

Relevante Prozesseigenschaften sind die erforderliche Prozesskraft und die resultierende Werkzeugbeanspruchung. Bei Adaption des Prozesses ist ein möglichst geringer Kraftbedarf anzustreben, um negative Auswirkungen auf die Matrizenauflfederung und die Profilgenauigkeit sowie das Auftreten einer kritischen Beanspruchung zu vermeiden. Vor dem Hintergrund der Materialausnutzung wird auf eine hohe Formfüllung abgezielt, wobei eine Materialeffizienz von mindestens 65 % angestrebt wird, um deutliche Einsparungen gegenüber der konventionellen Herstellung zu erreichen. Neben der lokalen Verfestigung der Zahnflanke (Bild 44) wurden die Oberflächentopografie (Bild 23) und die Verzahnungsgenauigkeit als einsatzrelevante Bauteileigenschaften identifiziert. Rautiefe und

Vorzugsrichtung beeinflussen das Auftreten der Verschleißmechanismen Abrasion und Adhäsion. Die Genauigkeit des Profils und der Flankenlinie wirkt sich auf die Bewegungsübertragung der Verzahnung aus, wobei für normale Anwendungen mindestens Stufe 9 gefordert wird [16].

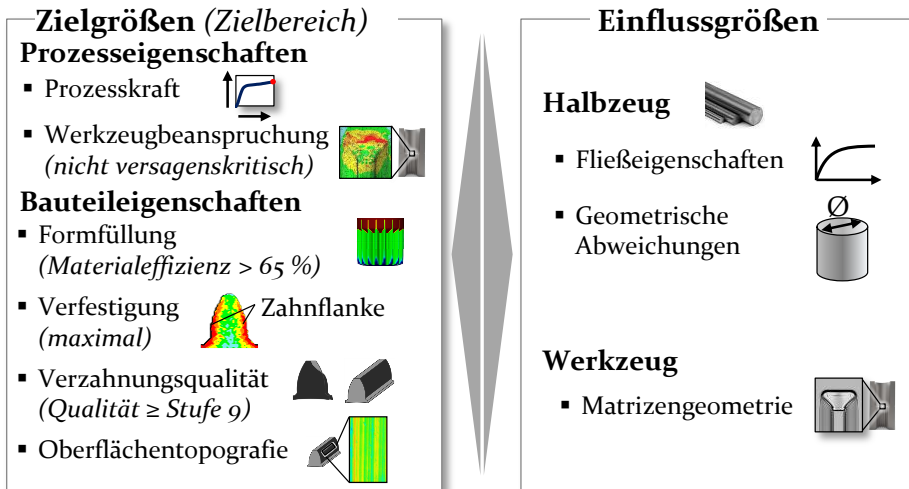


Bild 50: Zielgrößen und deren Zielbereich sowie mögliche prozesseitige Einflussgrößen

Als mögliche Einflussgrößen werden die Fließeigenschaften des Zahnradwerkstoffs und geometrische Abweichungen des Halbzeugs untersucht. Den wichtigsten werkzeugseitigen Stellhebel bietet die Matrizengeometrie.

## 7.2 Ermittlung des Einflusses halbzeugseitiger Größen

Im Folgenden werden der Einfluss des eingesetzten Halbzeugs auf den Fließpressprozess und die resultierenden Bauteileigenschaften der Verzahnung ermittelt sowie die zugrundeliegenden Wirkzusammenhänge identifiziert. Neben den Auswirkungen veränderter Fließeigenschaften des Zahnradwerkstoffs wird der Einfluss der geometrischen Genauigkeit des Halbzeugs untersucht.

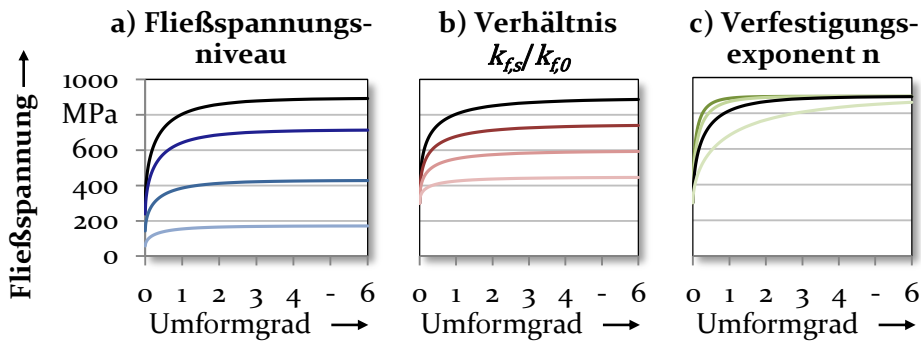
### 7.2.1 Fließeigenschaften

Die Anfangsfließspannungen der Zahnradwerkstoffe liegen auf einem vergleichbaren Niveau. Aufgrund der verschiedenen Legierungszusammensetzungen und Materialzustände resultiert allerdings ein abweichendes Verfestigungsverhalten. Dies zeigt sich in variierenden Verfestigungsexponenten  $n$  der mittels Hocket-Sherby [168] approximierten Fließkur-

ven (Bild 7) sowie unterschiedlichen Sättigungsfließspannungen. Die Sättigungsfließspannung  $k_{f,s}$  des Werkstoffs 16MnCr5+A steigt gegenüber der Anfangsfließspannung  $k_{f,0}$  auf 316 % an. Demgegenüber liegt die Sättigungsfließspannung von CuZn37+C bei 293 % und bei AlMgSi1, das im vorverfestigten T6 Zustand vorliegt, lediglich bei 141 % der Anfangsfließspannung. Die Verfestigungsexponenten betragen  $n = 1,88$  (16MnCr5+A),  $n = 2,35$  (CuZn37+C) und  $n = 3,96$  (AlMgSi1 T6).

### Variation der Fließkurvenparameter

Es liegen bisher keine Untersuchungen vor, wie sich variierende Fließeigenschaften auf die erzielbaren Bauteileigenschaften beim Vorwärtsfließpressen von Verzahnungen auswirken. Vor diesem Hintergrund werden die Auswirkungen der Fließkurvenparameter ermittelt und die zugrundeliegende Wirkzusammenhänge erarbeitet. Die Analyse erfolgt mit Hilfe des validierten numerischen FE-Modells, da in Realversuchen keine gezielte Variation der Fließeigenschaften unabhängig voneinander und ohne Beeinflussung der tribologischen Bedingungen möglich ist. Die Fließkurvenparameter werden ausgehend von der approximierten Fließkurve des Stahlwerkstoffs 16MnCr5+A als Referenz innerhalb des von Hockett-Sherby für kaltumformbare Metallwerkstoffe ermittelten Bereichs [168] variiert (Bild 51).



**Extrapolation Hockett-Sherby:**  $k_f(\varphi) = k_{f,s} - (k_{f,s} - k_{f,0}) * e^{-n\varphi^p}$   
**Referenz:**  $k_{f,0} = 298$  MPa,  $k_{f,s} = 894$  MPa,  $k_{f,s}/k_{f,0} = 300$  %,  $n = 2$ ,  $p = 0,58$

a) Fließspannungsniveau	b) Verhältnis $k_{f,s}/k_{f,0}$	c) Verfestigungsexponent $n$
— 40 %	— 150 %	— N=1
— 60 %	— 200 %	— N=2 (Referenz)
— 80 %	— 250 %	— N=3
— 100 % (Referenz)	— 300 % (Referenz)	— N=4

Bild 51: Variation der Fließkurvenparameter für die numerische Analyse

Zum einen wird das Fließspannungsniveau variiert, wozu ohne Veränderung des Verfestigungsverhaltens die Anfangs- und Sättigungsfließspannungen gleichermaßen herabgesetzt werden (Bild 51 a). Zudem wird das Verhältnis von Sättigungs- zu Anfangsfließspannung ( $k_{f,s}/k_{f,0}$ ) zwischen 300 % und 150 % verändert, womit sowohl das Verfestigungspotential des weichgeglühten Stahlwerkstoffs 16MnCr5+A als auch des vorverfestigten Aluminiums AlMgSi1 T6 berücksichtigt wird (Bild 51 b). Mit einem zunehmenden Verhältnis  $k_{f,s}/k_{f,0}$  wird trotz identischer Anfangsfließspannung eine erhöhte Sättigungsfließspannung erreicht. Der Verfestigungs-exponent  $n$  (Bild 51 c) wird zwischen  $n = 1$  und  $n = 4$  variiert. Bei einem erhöhten Exponenten wird die Sättigungsfließspannung bereits bei geringeren Umformgraden erreicht.

### Auswirkungen auf die Verfestigung

Mit Hilfe des FE-Modells wird der Einfluss der Fließkurvenparameter auf die Verfestigung des Zahnprofils ausgewertet (Bild 52). Die Variation der Fließeigenschaften wirkt sich nicht auf die Umformgrade entlang des Zahnprofils aus, es resultieren deutliche Unterschiede hinsichtlich der absoluten Festigkeit und relativen Verfestigung.

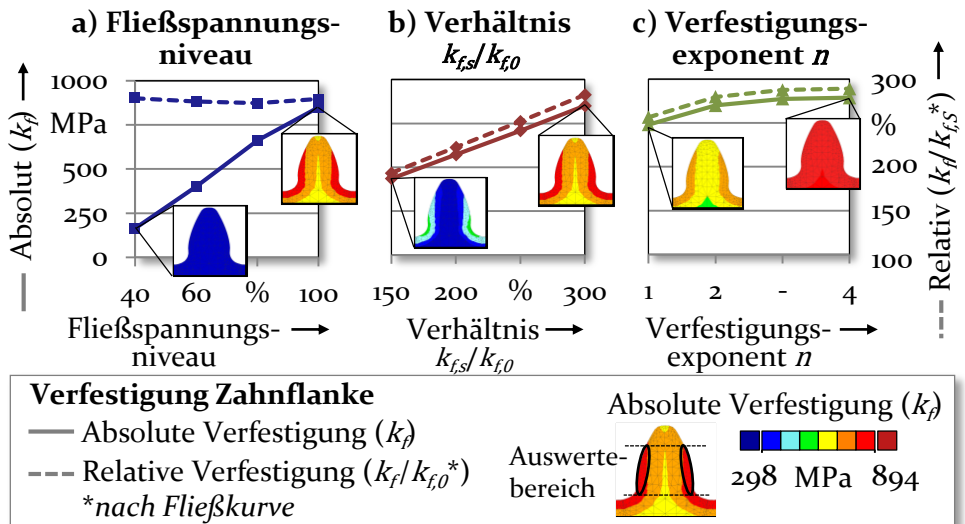


Bild 52: Einfluss der Fließeigenschaften auf die Verfestigung (numerisch)

Bei erhöhtem Niveau der Fließspannung (Bild 52 a) folgt eine zunehmende absolute Festigkeit ( $k_f$ ), wohingegen die relative Verfestigung im Verhältnis zur Anfangsfließspannung ( $k_f/k_{f,0}$ ) unverändert bleibt. Dies ist auf das gleichbleibende Verfestigungsverhalten zurückzuführen. Ein gesteigertes

Verfestigungspotential (Bild 52 b) führt aufgrund der höheren Sättigungsfließspannung zu einer linearen Zunahme der Verfestigung des Zahnprofils. Auch ein erhöhter Verfestigungsexponent (Bild 52 c) bewirkt eine deutlich erhöhte absolute und relative Verfestigung, was auf den steileren Verlauf der Fließkurve zurückzuführen ist.

### Auswirkungen auf die Formfüllung

In Bild 53 wird die numerisch ermittelte Formfüllung ausgewertet, wobei diese, wie in Bild 12 gezeigt, durch ein Materialdefizit im Verzahnungsbereich (Einzug außen) oder ein Materialeinzug in der Bauteilmitte (Einzug innen) begrenzt wird und anhand eines 3D-Abgleichs mit der Sollgeometrie sowie in der Schnittansicht ermittelt wird.

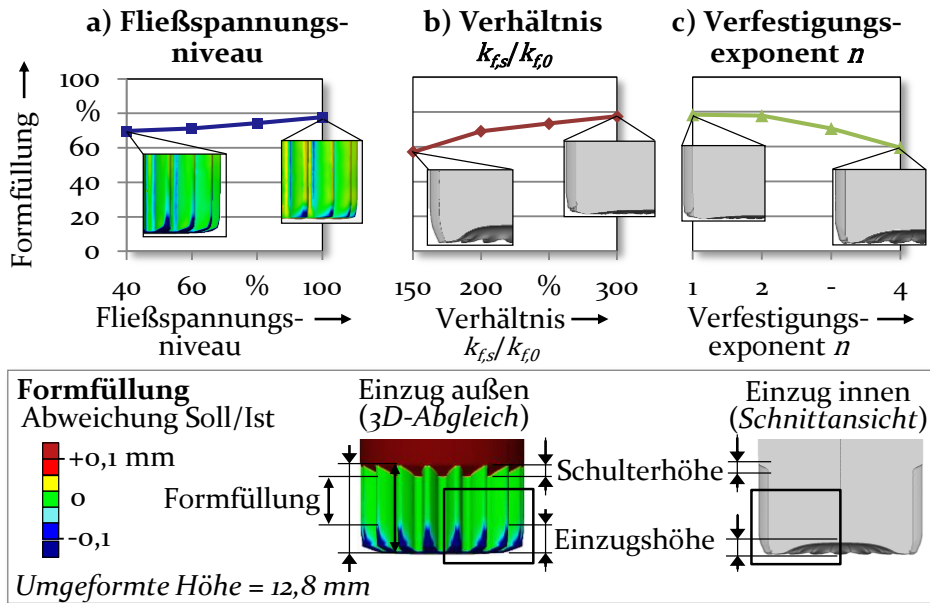


Bild 53: Einfluss der Fließeigenschaften auf die Formfüllung (numerisch)

Mit zunehmendem Fließspannungsniveau (Bild 53 a) wird die Formfüllung erhöht und die äußere Einzugshöhe nimmt deutlich ab. Der Einzug wird von 2,14 mm (40 %) auf 1,12 mm bei 100 % Fließspannungsniveau verringert. Dies wird auf eine reduzierte Materialflussgeschwindigkeit zu Prozessbeginn bei erhöhtem Fließwiderstand zurückgeführt. Bei geringem Verfestigungspotential (Bild 53 b) tritt dagegen die Bildung eines Materialeinzugs in der Bauteilmitte auf, der auch bei der Umformung von AlMgSi<sub>1</sub> im Zustand T6 festgestellt wurde (Bild 47) und die Formfüllung maßgeblich reduziert. Mit zunehmendem Verfestigungspotential wird der Einzug innen von 3,77 mm (Potential 150 %) auf 1,15 mm (300 %) verringert

und die Formfüllung von 57,0 % auf 77,5 % erhöht. Demgegenüber wird der innere Einzug mit zunehmendem Verfestigungsexponenten (Bild 53 c) erhöht, wodurch die Formfüllung bei  $n = 4$  auf 59,4 % reduziert wird.

### Auswirkungen auf die Verzahnungsgenauigkeit

In Bild 54 ist die resultierende Verzahnungsgenauigkeit hinsichtlich der Profil- und Flankenlinien-Gesamtabweichungen dargestellt.

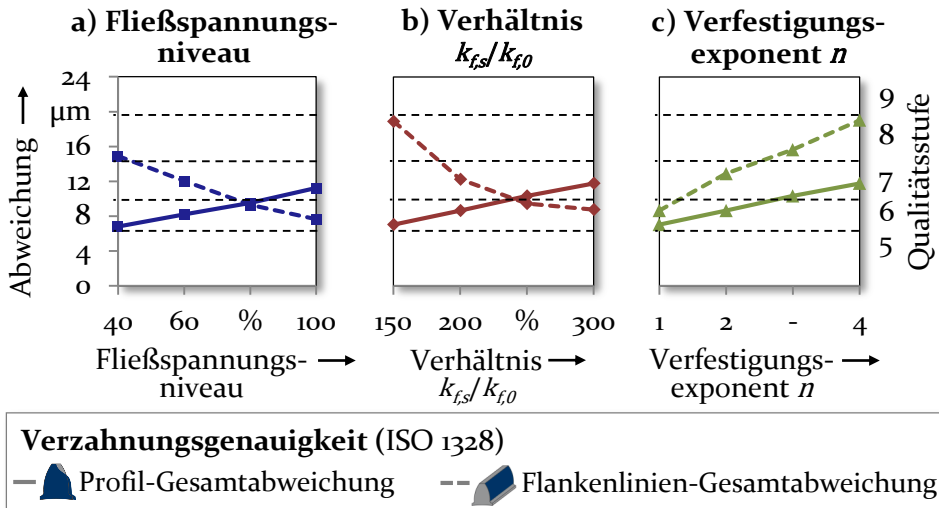


Bild 54: Einfluss der Fließeigenschaften auf die Verzahnungsgenauigkeit (numerisch)

Es ergibt sich eine reduzierte Profilabweichung bei geringerem Fließspannungsniveau (Bild 54 a), was mit der aufgrund der niedrigeren Prozesskraft verringerten Matrizenauflagerung begründet wird (Bild 48). Allerdings führt die reduzierte Formfüllung zu einer Erhöhung der Flankenlinien-Gesamtabweichungen. Es folgt somit bei verringertem Fließspannungsniveau (40 %) eine erhöhte Genauigkeit in Bezug auf die Profilabweichungen (Stufe 6), allerdings eine reduzierte Qualität der Flankenlinie (Stufe 8). Bei erhöhtem Verhältnis von Sättigungs- zu Anfangsfließspannung ( $k_{f,s}/k_{f,0}$ ) (Bild 54 b) resultieren jedoch vergrößerte Profilabweichungen (Stufe 7), da Prozesskraft und Matrizenauflagerung zunehmen. Durch die reduzierte Einzugsbildung wird die Flankenabweichung dagegen verringert (Stufe 6). Ein gesteigerter Verfestigungsexponent  $n$  (Bild 54 c) bewirkt neben einer Zunahme der Prozesskräfte und Profilabweichungen auch die Bildung eines Materialeinzugs in der Zahnradmitte. Hierdurch wird die Qualität der Flankenlinie bei einem Exponenten von  $n = 4$  auf Stufe 8 verringert.

## Erarbeitung der Wirkzusammenhänge

In den numerischen Untersuchungen wurden Auswirkungen des Verhältnisses der Sättigungs- zur Anfangsfließspannung ( $k_{f,s}/k_{f,0}$ ) sowie des Verfestigungsexponenten auf die Bildung eines Materialeinzuges identifiziert. Dieser wird durch ein Vorseilen des Materialflusses im Randbereich gegenüber der Zahnradmitte bedingt. Um die Ursachen des entlang des Zahnradquerschnittes variierenden Materialflusses zu ermitteln, wird zunächst die Umformgradverteilung analysiert (Bild 55).

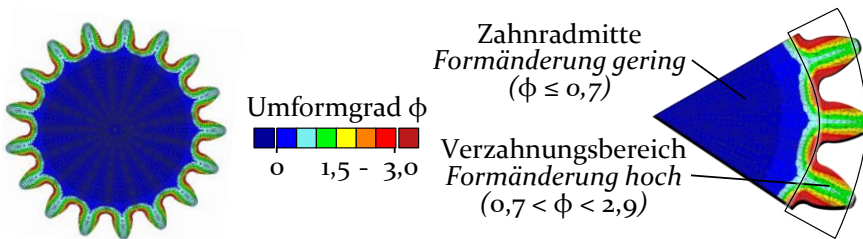


Bild 55: Umformgradverteilung entlang des Zahnradquerschnittes

Die ausgeprägte Querschnittsverringerung im Verzahnungsbereich bewirkt lokal hohe Umformgrade ( $0,7 < \phi < 2,9$ ), wohingegen in der Zahnradmitte lediglich eine geringe Formänderung ( $\phi \leq 0,7$ ) resultiert. Bei Variation der Fließeigenschaften liegt aufgrund des unterschiedlichen Verfestigungsverhaltens somit eine stark variierende relative Verfestigung des Zahnradquerschnittes vor. Diese bedingt abweichende Fließwiderstände im Randbereich des Zahnrads gegenüber der Mitte, die zu einer lokal variierenden Materialflussgeschwindigkeit führen. In Bild 56 wird der numerisch ermittelte Einfluss der Fließeigenschaften auf die relative Verfestigung des Zahnradquerschnittes und die resultierende Materialflussgeschwindigkeit zusammengefasst.

Bei einem hohen Verhältnis  $k_{f,s}/k_{f,0}$  von 300 % (Bild 56 a) kommt es im Verzahnungsbereich aufgrund der lokal hohen Umformgrade zu einer starken relativen Verfestigung, wohingegen im Mittenbereich nur eine geringe Verfestigung vorliegt. Die hohe Verfestigung führt zu einem lokal erhöhten Fließwiderstand, weshalb die axiale Materialflussgeschwindigkeit ( $V_{axial}$ ) im Verzahnungsbereich stark verringert wird. Demgegenüber resultiert bei einer im Verhältnis zur Anfangsfließspannung niedrigen Sättigungsfließspannung (150 %) trotz hoher Umformgrade eine geringe relative Verfestigung im Verzahnungsbereich. Hieraus folgt eine geringe, weitgehend homogene Verfestigung und ein ähnlicher Fließwiderstand entlang des Zahnradquerschnitts. Die im Verzahnungsbereich starke Querschnittsverringerung bewirkt in Verbindung mit dem geringen Fließwiderstand

eine hohe Materialflussgeschwindigkeit, die zu einem Vorauseilen des Stoffflusses gegenüber der Zahnradmitte führt.

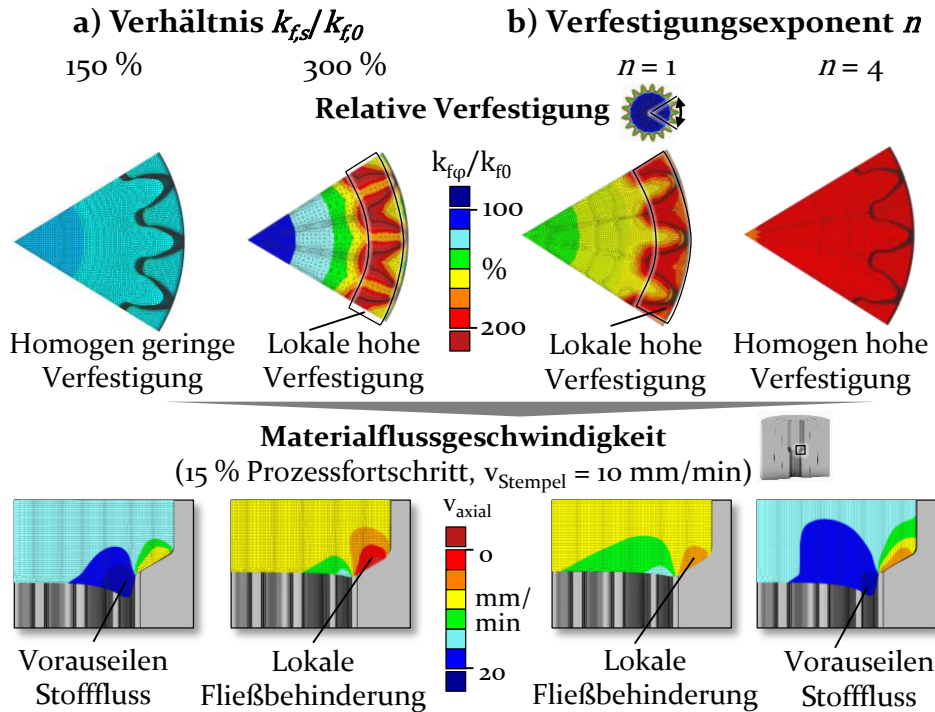


Bild 56: Auswirkung des Verhältnisses  $k_{f,s}/k_{f,0}$  (a) sowie des Verfestigungsexponenten (b) auf die numerisch ermittelte Verfestigung und Materialflussgeschwindigkeit

Bei geringem Verfestigungsexponenten ( $n=1$ ) tritt lediglich im Verzahnungsbereich, bedingt durch die hohen Umformgrade, eine starke relative Verfestigung auf (Bild 56 b). Der lokale Fließwiderstand reduziert ein Vorauseilen des Stoffflusses in diesem Bereich und bewirkt eine erhöhte Formfüllung. Dagegen führt ein hoher Verfestigungsexponent ( $n=4$ ) zu einer hohen relativen Verfestigung bereits bei geringen Umformgraden (Bild 51), wie sie in der Zahnmitte vorliegen ( $\phi = 0,1$  bis  $0,3$ ). Aus diesem Grund wird die Sättigungsfließspannung wesentlich früher erreicht und es liegt im Zahnradquerschnitt eine homogene, hohe Verfestigung und ein gleichmäßiger Fließwiderstand vor. Dies bedingt ein Vorauseilen des Stoffflusses im Verzahnungsbereich und die Bildung eines Materialeinzuges in der Zahnradmitte.

Ein geringes Verhältnis  $k_{f,s}/k_{f,0}$  und ein hoher Verfestigungsexponent ( $n$ ), die beim Aluminiumwerkstoff AlMgSi<sub>1</sub> im T6 Zustand vorliegen, führen zur Bildung eines Materialeinzuges sowie hohen Flankenlinien-Gesamtabweichungen. Dies erklärt die von ALVES ET AL. [91] identifizierte geringe

Formfüllung beim Fließpressen von Aluminiumzahnradern. Zudem wird aufgrund des reduzierten Verfestigungspotentials eine geringe relative Verfestigung erreicht, weshalb eine vergleichsweise niedrige Zahnflankenhärte vorliegt. Um die Materialausnutzung zu erhöhen und die einsatzrelevante Zahnflankenhärte zu steigern, sind die gezielte Reduzierung der lokalen Materialflussgeschwindigkeit im Verzahnungsbereich sowie die Erhöhung der Umformgrade erforderlich.

### 7.2.2 Geometrische Abweichungen des Halbzeugs

Einflüsse auf die Verzahnungsgenauigkeit beim Fließpressen von Zahnradern bestehen innerhalb der Bauteilauslegung durch die Fließeigenschaften des Zahnradwerkstoffs (Bild 54) sowie die Zahngeometrie [78]. Es bestehen allerdings keine Erkenntnisse darüber, wie sich die geometrische Genauigkeit des Halbzeugs auf die Prozess- und Bauteileigenschaften auswirkt. Abweichungen der Rohlinggeometrie resultieren aufgrund Chargenschwankungen des Stangenmaterials [140], Verzug infolge Wärmebehandlung [193] sowie dem Scherschneidprozess zur Vereinzelnung der Rohlinge [82]. Aufgrund der offenen Matrizengestaltung ist kein Einfluss einer abweichenden Länge der Rohlinge auf den Umformprozess zu erwarten. Untersucht wird im Folgenden, ob sich ein abweichender Rohlingdurchmesser auswirkt.

Im Referenzprozess erfolgte eine enge Tolerierung der geometrischen Maße der Rohlinge nach ISO-Toleranzklasse 7 (Bild 5) [194]. Im Folgenden wird numerisch der Einfluss negativer als auch positiver Abweichungen des Rohlingdurchmessers im Bereich der Toleranzklassen 7 bis 12 auf die Prozess- und Bauteileigenschaften untersucht (Tabelle 6).

Tabelle 6: Abweichungen des Rohlingdurchmessers nach den ISO-Toleranzklassen

	Grenzabmaß	Rohlingdurchmesser	
		Negatives Abmaß (-)	Positives Abmaß (+)
<b>Nennmaß</b>	0 µm	19,379 mm	
<b>IT 7</b>	21 µm	19,358 mm	19,400 mm
<b>IT 8</b>	33 µm	19,346 mm	19,412 mm
<b>IT 9</b>	52 µm	19,327 mm	19,431 mm
<b>IT 10</b>	84 µm	19,395 mm	19,463 mm
<b>IT 11</b>	130 µm	19,249 mm	19,509 mm
<b>IT 12</b>	210 µm	19,169 mm	19,589 mm

## Auswirkungen auf die Prozesskraft und Werkzeugbeanspruchung

In Bild 57 ist der Einfluss des Durchmessers des Rohlings auf die Prozesskraft und Werkzeugbeanspruchung dargestellt. Mit abnehmendem Rohlingdurchmesser ist für alle Werkstoffe eine Verringerung der maximalen Prozesskräfte und Werkzeugbeanspruchung festzustellen.

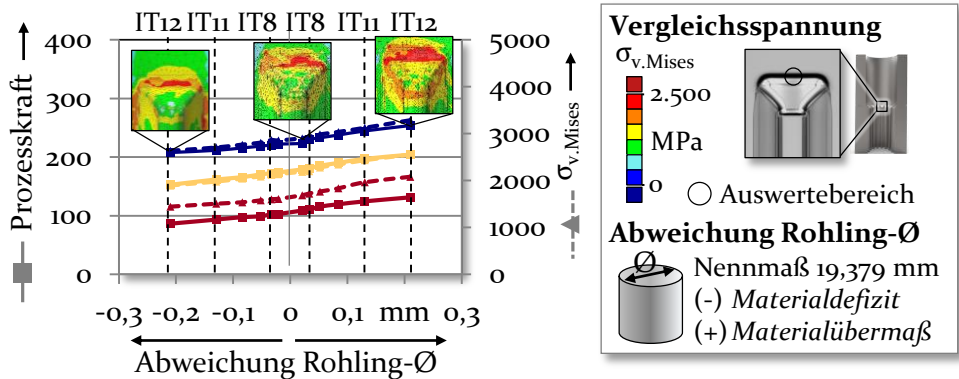


Bild 57: Einfluss des Rohlingdurchmessers auf Prozesskraft und Werkzeugbeanspruchung (numerisch)

Dies wird auf die bei geringerem Durchmesser reduzierte Querschnittsfläche zurückgeführt, weshalb der Kraftbedarf zum Erreichen der Fließspannung abnimmt. Demgegenüber folgt bei einem Materialübermaß des Rohlings gegenüber dem Kopfkreisdurchmesser der Verzahnung eine Erhöhung des umzuformenden Volumens, wodurch die Prozesskraft ansteigt. Zudem nehmen die Kontaktfläche des Rohlings mit der Matrize und die resultierende Reibung zu. Die maximale Prozesskraft steigt bei Umformung von 16MnCr5+A ausgehend von 207,8 kN bei einem negativen Abmaß innerhalb IT12 um 22 % auf 253,8 kN bei einem positiven Abmaß. Ein Übermaß des Rohlingdurchmessers oberhalb IT11 führt bei Umformung von 16MnCr5+A zu Vergleichsspannungen im Schulterbereich von mehr als  $3.289 \pm 187$  MPa, die als versagenskritisch zu bewerten sind [66]. Durch erhöhte Prozesskraft werden eine vergrößerte elastische Werkzeugauffederung sowie ein zunehmender Kontaktdruck in der Matrize bedingt. Hierdurch sind Auswirkungen auf die Profilabweichungen und die Oberflächeneinglättung zu erwarten.

## Auswirkungen auf Formfüllung

Nachfolgend wird die Formfüllung bei Variation des Rohlingdurchmessers ausgewertet (Bild 58). Maßgeblich ist die prozessbedingte Einzugshöhe im unteren Werkstückbereich (Einzug außen).

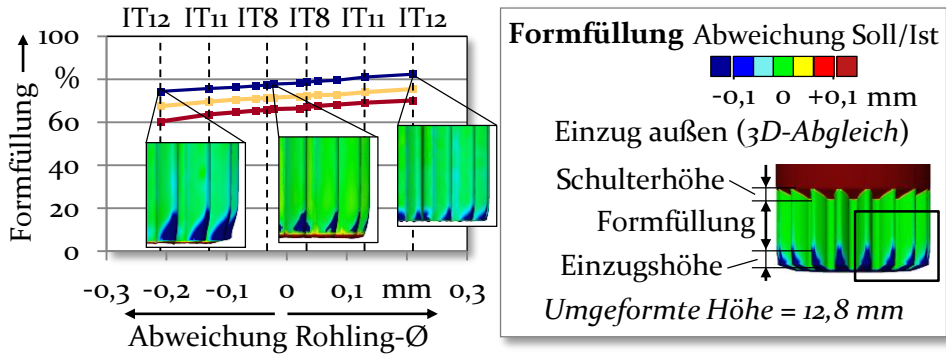


Bild 58: Einfluss des Rohlingdurchmessers auf die Formfüllung

Ein Materialdefizit aufgrund reduzierten Rohlingdurchmessers bewirkt eine Zunahme der Einzugshöhe im unteren Werkstückbereich. Die Formfüllung nimmt für den Werkstoff 16MnCr5+A von 74,3 % (negatives Abmaß IT12) auf 77,7 % (Referenz, IT7) und 82,3 % (positives Abmaß IT12) zu.

### Auswirkungen auf die Verzahnungsgenauigkeit

Die resultierende Verzahnungsgenauigkeit ist in Bild 59 dargestellt. Ausgewertet werden die Qualitätsstufen des Profils und der Flankenlinie.

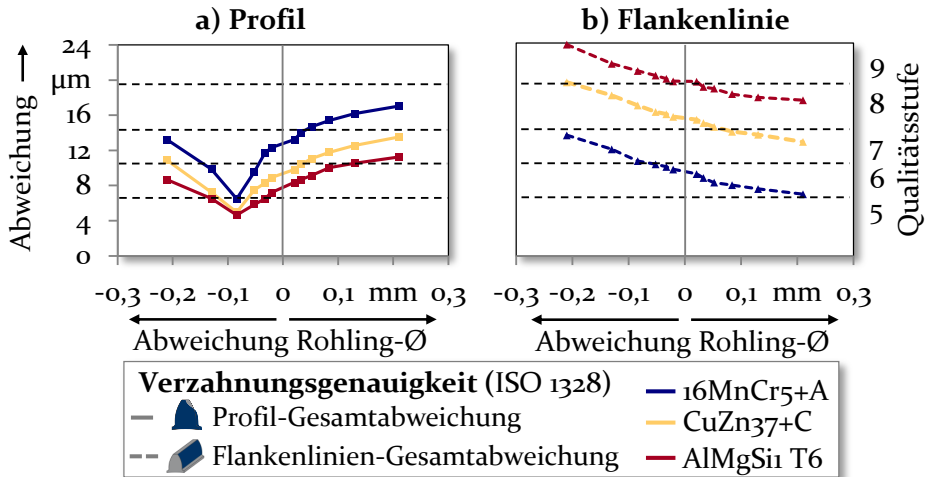


Bild 59: Einfluss des Rohlingdurchmessers auf die Verzahnungsgenauigkeit

Minimale Profil-Gesamtabweichungen (Bild 59 a) resultieren für alle drei Zahnradwerkstoffe bei einem geringfügigen negativen Abmaß (IT10) des Rohlingdurchmessers gegenüber dem Nennmaß. Dagegen nimmt die erreichbare Genauigkeit des Profils bei einem hohen Materialdefizit oder -übermaß des Rohlings deutlich ab. Bei einem positiven Abmaß des Rohlingdurchmessers verschlechtert sich die Genauigkeit des Zahnprofils

für jeden Werkstoff jeweils um zwei Stufen. Die Abweichungen der Flankenlinie (Bild 59 b) steigen mit abnehmenden Rohlingdurchmesser deutlich an. Bei einem negativen Abmaß innerhalb IT<sub>12</sub> nimmt die Qualität der Flankenlinie eine Stufe gegenüber der Referenz ab.

### Erarbeitung der Wirkzusammenhänge

Die numerischen Ergebnisse zeigen unterschiedliche Auswirkungen für ein negatives und positives Abmaß des Rohlingdurchmessers auf die Genauigkeit des Profils sowie der Flankenlinie. Es ist somit keine allgemeingültige Aussage möglich, wie eine abweichende Toleranzlage die Genauigkeit der Verzahnung beeinflusst. Stattdessen ist zu berücksichtigen, ob ein Materialdefizit oder -übermaß vorliegt. Um die zugrundeliegenden Wirkzusammenhänge zu identifizieren, werden in Bild 60 der während der Umformung numerisch ermittelte Werkzeugkontakt und die radiale Aufweitung des Rohlings ausgewertet.

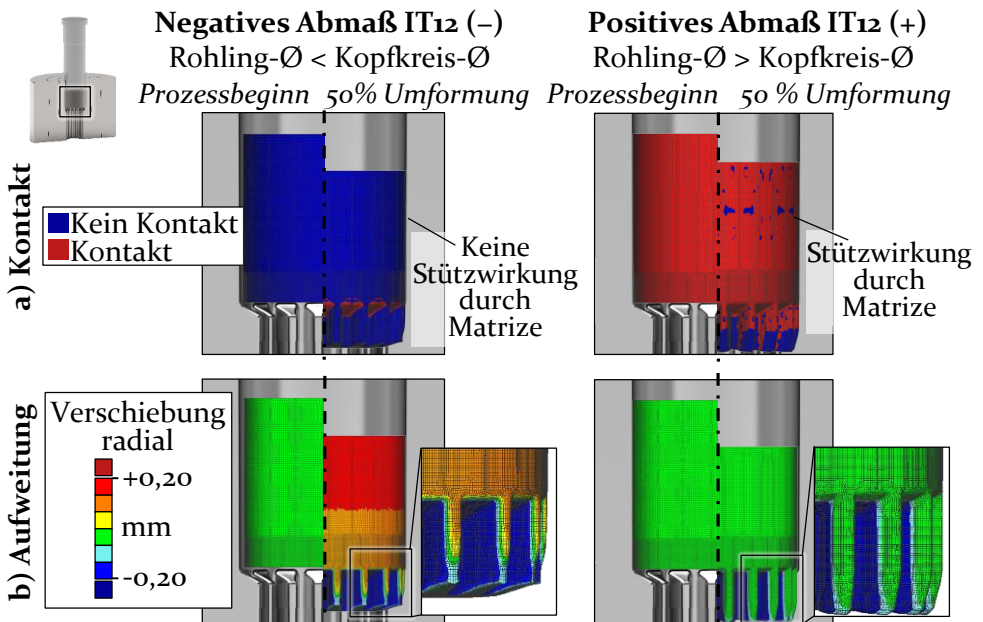


Bild 60: Auswirkung des Rohlingdurchmessers auf den numerisch ermittelten Werkzeugkontakt (a) und die radiale Aufweitung (b)

Bei einem negativen Abmaß innerhalb IT<sub>12</sub> tritt zu Prozessbeginn kein, bei einem positiven Abmaß hingegen vollständiger Kontakt zwischen Rohling und Matrizenwand auf (Bild 60 a). Während der Umformung resultiert infolge der durch den Stempel axial aufgebrachten Kraft eine radiale Verschiebung des Rohlingdurchmessers nach außen (Bild 60 b). Aufgrund der

bei verringertem Rohlingdurchmesser fehlenden Stützwirkung der Matrizenwand durch den ausbleibenden Werkzeugkontakt folgt eine zunehmende radiale Aufweitung, die über die Zahnradbreite nach oben zunimmt. Im Gegensatz dazu tritt bei erhöhtem Rohlingdurchmesser keine Aufweitung, sondern durch den Kontakt mit der Matrizenwand lediglich eine geringe negative radiale Verschiebung auf.

Bei verringertem Rohlingdurchmesser führt die hohe radiale Aufweitung im oberen Bereich zu einer variierenden Ausformung über die Zahnradbreite. Diese ist sowohl an einer Zunahme der prozessbedingten Einzugs-höhe (Bild 58) als auch deutlich erhöhten Abweichungen der Flankenlinie (Bild 59) zu erkennen. Ein Materialübermaß aufgrund eines erhöhten Durchmessers des Rohlings bewirkt einen vollständigen Werkzeugkontakt im Matrizen einlauf, wodurch ein verfrühter Prozessbeginn sowie eine Zunahme der Reibung und des Kraftbedarfs resultieren (Bild 57). Aufgrund des erhöhten Kontaktdruckes ist ein Einfluss auf die Oberflächentopografie der Zahnflanken zu erwarten.

### 7.3 Untersuchung werkzeugseitiger Maßnahmen

Beim Fließpressen von Werkstoffen im vorverfestigten Zustand, der beim Einsatz von Aluminium erforderlich ist, resultiert eine geringe Materialausnutzung aufgrund einer lokal erhöhten Stofffluss- geschwindigkeit. Zudem wird im Referenzprozess eine ungenügende Verfestigung erreicht. Bei einem durch die Anwendung vorgegebenen Werkstoff und Schmiersystem bietet die Matrizengeometrie den wichtigsten Stellhebel [124], um den Materialfluss zu beeinflussen. Im Folgenden werden daher werkzeugseitige Stellhebel zur Reduzierung der Materialflussgeschwindigkeit im Verzahnungsbereich und gezielten Erhöhung der lokalen Umformgrade der Zahnflanke untersucht (Bild 61).

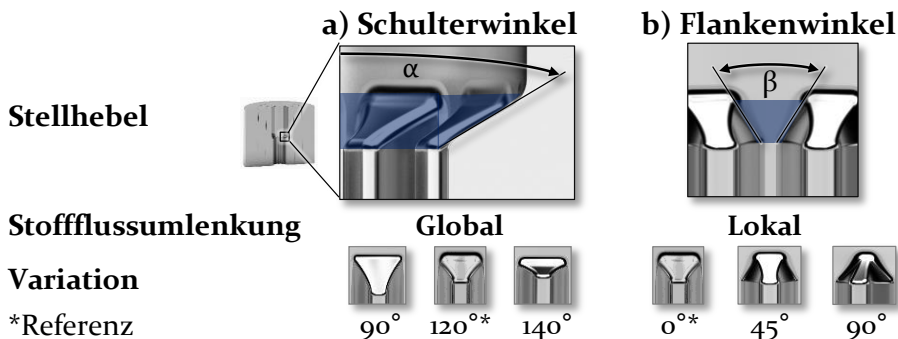


Bild 61: Untersuchte werkzeugseitige Stellhebel bei der Zahnradherstellung

Die Anpassung des Matrzenschulterwinkels (Bild 61 a) stellt eine aus der Literatur [72] bekannte Maßnahme zur globalen Erhöhung der Stoffflussumlenkung und Verbesserung der Formfüllung dar, wobei die Auswirkungen auf die Umformung verschiedener Werkstoffe und die Genauigkeit sowie Verfestigung des Zahnprofils unbekannt sind. Zur Erzielung einer lokal begrenzten Stoffflussumlenkung wird im Rahmen dieser Arbeit die gezielte Anpassung der Matrizengeometrie untersucht. Diese wird durch Erweiterung des Einlaufbereichs um einen Flankenwinkel erreicht (Bild 61 b), wobei die herzustellende Zahngeometrie unverändert bleibt. Ziel ist es, den Materialfluss in Richtung Zahnflanke zu steuern, um die Formfüllung zu verbessern und die Verfestigung lokal zu steigern. Gleichzeitig werden eine möglichst geringe maximale Prozesskraft und Werkzeugbeanspruchung angestrebt.

### Auswirkungen auf die Prozesskraft und Werkzeugbeanspruchung

Bild 62 zeigt den Einfluss der werkzeugseitigen Stellhebel auf die Prozesseigenschaften. Zur Bewertung der Werkzeugbeanspruchung werden die maximale Prozesskraft und die Vergleichsspannung im Schulterbereich der Matrize ausgewertet.

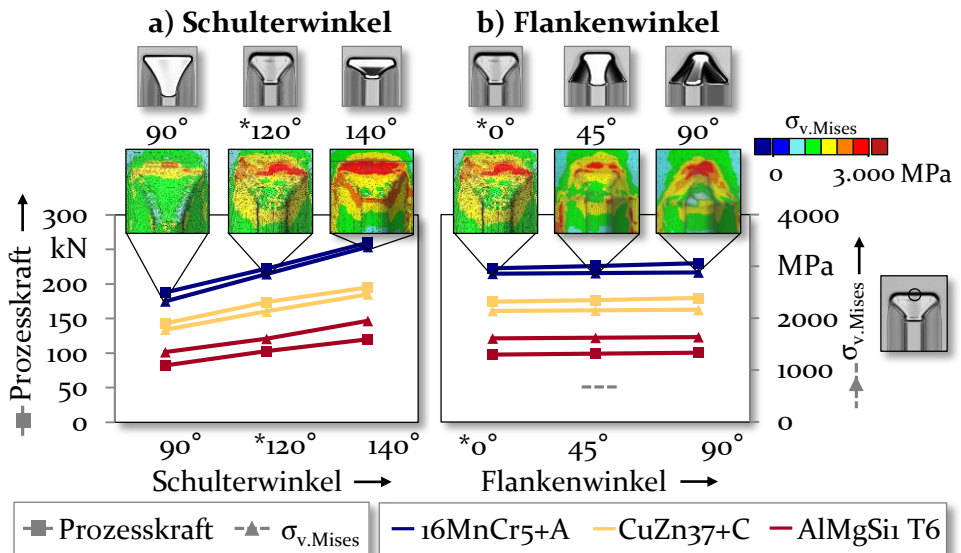


Bild 62: Einfluss von Schulter- und Flankenwinkel auf die maximale Prozesskraft und Werkzeugbeanspruchung (numerisch)

Ein vergrößerter Schulterwinkel (Bild 59 a) bewirkt aufgrund der zunehmenden Fließbehinderung bei Umformung aller drei Zahnradwerkstoffe einen erhöhten Kraftbedarf. Gegenüber einem Winkel von  $90^\circ$  nehmen die

maximalen Prozesskräfte von 187,8 kN (16MnCr5+A), 142,9 kN (CuZn37+C) sowie 82,4 kN (AlMgSi T6) auf 259,9 kN (+39 %), 195,2 kN (+37 %) sowie 129,1 kN (+45 %) bei 140° Schulterwinkel zu. Dementsprechend steigt die Vergleichsspannung  $\sigma_{v.Mises}$  an und erreicht bei Umformung von 16MnCr5+A versagenskritische Werte [66] von  $3,383 \pm 232$  MPa. Bei Variation des Flankenwinkels (Bild 59 b) ist dagegen kein maßgeblicher Einfluss auf die maximale Prozesskraft und Werkzeugbeanspruchung zu erkennen. Gegenüber der Referenz (0°) steigt die maximale Prozesskraft bei einem Flankenwinkel von 90° lediglich um 2,9 bis 3,2 % an.

### Auswirkungen auf die Formfüllung

In Bild 63 wird die erreichbare Formfüllung ausgewertet. Diese wird sowohl durch einen prozessbedingten Abdruck der Matrizenschulter (Schulterhöhe) als auch durch ein Materialdefizit im Verzahnungsbereich oder der Zahnradmitte (Einzugshöhe) begrenzt.

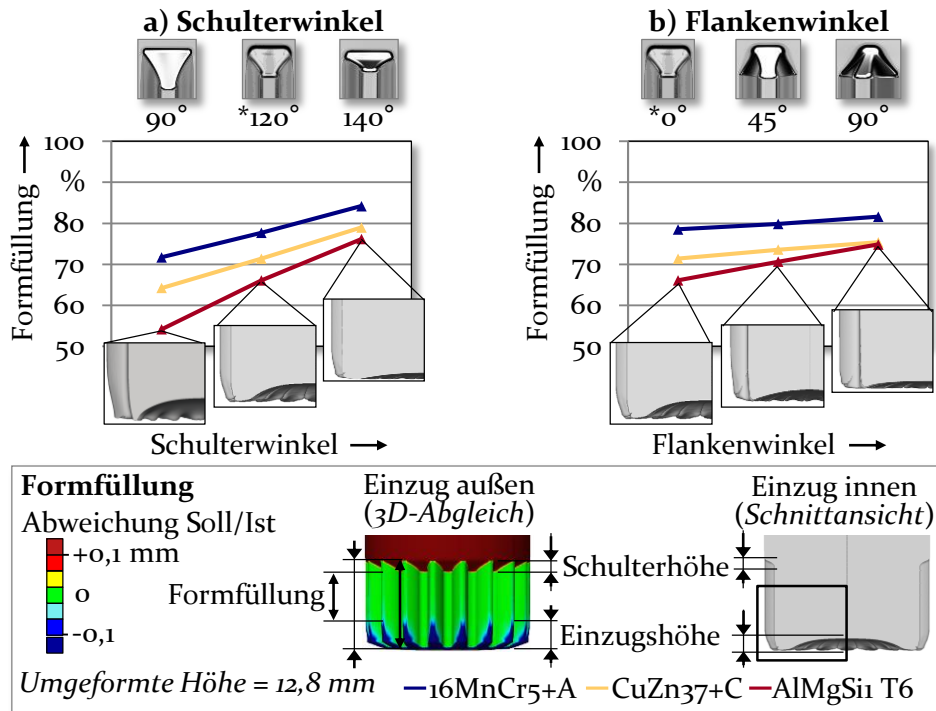


Bild 63: Einfluss von Schulter- und Flankenwinkel auf die Formfüllung (numerisch)

Sowohl die Anpassung des Schulterwinkels (Bild 63 a) als auch des Flankenwinkels (Bild 63 b) führen zu einer deutlichen Zunahme der nutzbaren Höhe der Verzahnung. Dies ist im Wesentlichen auf die Reduzierung der

Materialflussgeschwindigkeit durch die stärkere Stoffflussumlenkung zurückzuführen, wodurch der Werkzeugkontakt erhöht und die Einzugsgröße des Verzahnungsbereichs reduziert wird. Bei der Umformung von AlMgSi T6, bei der im Referenzprozess aufgrund des in Abschnitt 7.2.1 identifizierten Verfestigungsverhaltens ein Vorseilen des Stoffflusses im Verzahnungsbereich resultiert, wird die Bildung eines Materialeinzuges in der Zahnradmitte durch die erhöhte Stoffflussumlenkung verhindert. Aus diesem Grund wird die Formfüllung der AlMgSi T6 Zahnräder durch die Maßnahmen stärker erhöht als bei 16MnCr5+A und CuZn37+C. Zudem wird bei Vergrößerung des Schulterwinkels konstruktionsbedingt die Höhe des am Zahnrad verbleibenden Schulterabdrucks (Schulterhöhe) verringert, weshalb die Formfüllung zusätzlich verbessert wird.

Dagegen bleibt die Schulterhöhe bei Anpassung des Flankenwinkels unverändert. Bei maximalem Schulterwinkel von  $140^\circ$  wird die Formfüllung auf 84,2 % (16MnCr5+A), 79,0 % (CuZn37+C) sowie 76,2 % (AlMgSi T6). Demgegenüber bewirkt ein Flankenwinkel von  $90^\circ$  eine Formfüllung von 81,6 % (16MnCr5+A), 75,4 % (CuZn37+C) sowie 74,8 % (AlMgSi T6).

### Auswirkungen auf die Verzahnungsgenauigkeit

Der Einfluss der werkzeugseitigen Maßnahmen auf die erzielbare Verzahnungsgenauigkeit wird in Bild 64 dargestellt.

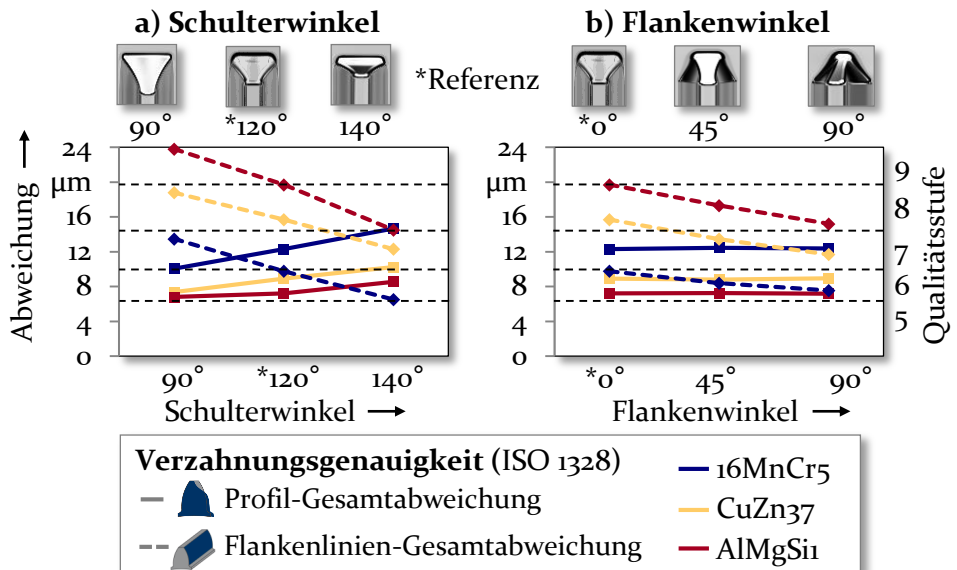


Bild 64: Einfluss von Schulter- und Flankenwinkel auf die Verzahnungsgenauigkeit (numerisch)

Wie in Bild 62 gezeigt, werden die maximalen Prozesskräfte bei einem Schulterwinkel von  $140^\circ$  aufgrund der stärkeren Stoffflussumlenkung deutlich gesteigert. Dies bewirkt aufgrund der erhöhten Matrizenaufweitung (Bild 48) auch eine Vergrößerung der Profil-Gesamtabweichungen, wodurch die hinsichtlich des Profils erreichbare Qualitätsstufe der 16MnCr5+A und CuZn37+C Zahnräder um je eine Stufe verschlechtert wird. Dagegen ist bei angepassten Flankenwinkeln aufgrund der nur marginal erhöhten Prozesskräfte, kein Einfluss auf die Profiligenauigkeit feststellbar.

Aufgrund der bei vergrößerten Schulter- und Flankenwinkeln reduzierten Einzugshöhen (Bild 63) werden - wie bereits in Bild 49 festgestellt - die Abweichungen der Flankenlinie deutlich reduziert. Gegenüber dem Referenzprozess, bei dem Stufe 7 (16MnCr5+A), Stufe 8 (CuZn37+C) und Stufe 9 (AlMgSi1 T6) erreicht wird, steigert sich die Verzahnungsqualität bei  $140^\circ$  Schulterwinkel und bei  $90^\circ$  Flankenwinkel um jeweils eine Stufe.

### Auswirkungen auf die Verfestigung

Die numerisch ermittelte Verfestigung des Zahnprofils ist in Bild 65 dargestellt. Die Anpassung der Werkzeuggeometrie wirkt sich bei den verschiedenen Zahnradwerkstoffen gleichermaßen auf die Umformgrade des Zahnprofils aus.

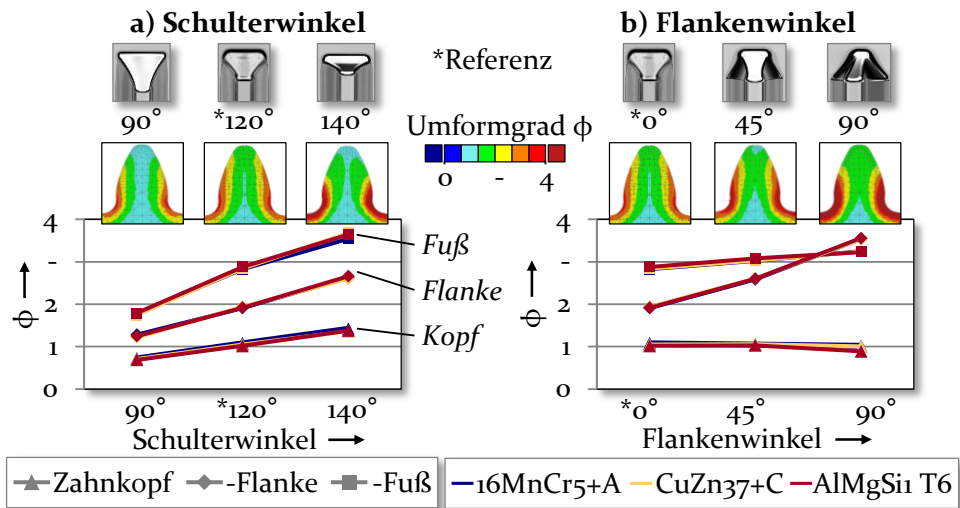


Bild 65: Einfluss von Schulter- und Flankenwinkel auf die lokale Verfestigung

Ein vergrößerter Schulterwinkel (Bild 65 a) führt zu einer globalen Erhöhung der Verfestigung sowohl im Zahnkopf als auch in Zahnflanke und im Zahnfuß. Im einsatzrelevanten Bereich der Zahnflanke werden die Umformgrade beim Fließpressen der verschiedenen Werkstoffe gegenüber

einem Schulterwinkel von  $90^\circ$  bei  $140^\circ$  um 110 % auf  $\phi=2,60$  bis  $2,66$  erhöht. Die Anpassung des Flankenwinkels wirkt sich dagegen unterschiedlich auf die Verfestigung der verschiedenen Bereiche des Zahnprofils aus. Die Umformgrade im Zahnkopf und der Flanke steigen an, wobei insbesondere die Verfestigung der Zahnflanke deutlich erhöht wird (Bild 65 b). Die Umformgrade der Zahnflanke werden bei einem Flankenwinkel von  $90^\circ$  im Vergleich zur Referenz mit  $0^\circ$  Flankenwinkel um 85 % auf  $\phi=3,53$  bis  $3,56$  gesteigert. Dies wird auf die gezielte Umlenkung des Materialflusses in Richtung der Zahnflanke zurückgeführt. Demgegenüber wird die Verfestigung des Zahnkopfes aufgrund der veränderten Stoffflussrichtung geringfügig verringert.

## 7.4 Bewertung der numerischen Ergebnisse

Der erzielbaren Prozess- und Bauteileigenschaften werden durch die Fließigenschaften des Werkstoffs, geometrische Abweichungen des Halbzeugs sowie die Matrizengeometrie beeinflusst. Der Zahnradwerkstoff wird innerhalb der Auslegung der Zahnradpaarung vorgegeben. Um eine betriebsangepasste Herstellung zu ermöglichen, stellen daher die Halbzeug- und Matrizengeometrie wichtige Stellhebel dar (Bild 66).

		Wirkung ↗ Anstieg ↘ Abnahme	Bewertung Positiv Negativ	Einflussgrößen (Variation)			
				Halbzeuggeometrie		Matrizengeometrie	
				Rohlingdurchmesser		Schulterwinkel ↑ ( $90 - 140^\circ$ )	Flankenwinkel ↑ ( $0 - 90^\circ$ )
				Materialdefizit (IT <sub>7-12</sub> )	Materialübermaß (IT <sub>7-12</sub> )		
Zielgrößen (Zielbereich)	Prozess	Prozesskraft ( <i>minimal</i> )	↘	↗	↗↗	-	
		Werkzeugbeanspruchung ( <i>nicht versagenskritisch</i> )	↘ ( $\leq IT_{12}$ )	↗ ( $\leq IT_{10}$ )	↗↗ ( $\leq 120^\circ$ )	-	
	Bauteil	Formfüllung ( <i>Materialeffizienz <math>\geq 65\%</math></i> )	↘ ( $\leq IT_{10}$ )	↗ ( $\leq IT_{12}$ )	↗↗ ( $\geq 120^\circ$ )	↗ ( $\geq 0^\circ$ )	
		Genauigkeit ( <i>Qualität <math>\geq</math> Stufe 9</i> )	Profil	↗/↘ ( $\leq IT_8$ )	↘ ( $\leq IT_{10}$ )	↘ ( $\leq 120^\circ$ )	-
			Flanke	↘ ( $\leq IT_{12}$ )	↗ ( $\leq IT_{12}$ )	↗↗ ( $\geq 120^\circ$ )	↗↗ ( $90^\circ$ )
		Härte ( <i>maximal</i> )	Flanke	-	-	↗	↗↗

→ Toleranzlage Rohling IT8(-) bis IT10(+)      → Schulterwinkel  $120^\circ$   
Flankenwinkel  $90^\circ$

Bild 66: Numerisch identifizierter Einfluss von Halbzeug- und Matrizengeometrie auf die Zielgrößen und abgeleiteter Zielbereich der Stellhebel

Entsprechend des in Bild 50 definierten Zielbereichs der Zielgrößen werden die Vermeidung einer versagenskritischen Werkzeugbeanspruchung, eine Materialeffizienz von mindestens 65 %, sowie eine Verzahnungsqualität von Stufe 9 bei einer maximalen Flankenhärte gefordert. Ein Materialdefizit oder -übermaß des Rohlingdurchmessers wirkt sich auf den Werkzeugkontakt und somit die erzielbare Formfüllung sowie Genauigkeit der Verzahnung aus. Zudem nehmen die Prozesskraft und Werkzeugbeanspruchung bei einem Materialübermaß zu. Vor diesem Hintergrund ist eine Berücksichtigung der Toleranzlage des Rohlingdurchmessers erforderlich. Ein Materialdefizit sollte das Toleranzfeld IT8, ein Materialübermaß IT10 nicht überschreiten.

Die Anpassung des Schulterwinkels (Bild 61 a) erhöht die Formfüllung sowie die Verfestigung des gesamten Zahnprofils. Aufgrund der globalen Stoffflussumlenkung, die zu einer Fließbehinderung führt, resultieren allerdings kritische Werkzeugbeanspruchungen und eine hohe elastische Auffederung der Matrize, die die erzielbare Genauigkeit des Profils negativ beeinflusst. Ein Schulterwinkel von  $120^\circ$  sollte daher nicht überschritten werden.

Im Gegensatz dazu führt die Adaption der Matrizengeometrie um einen Flankenwinkel (Bild 61 b) zu einer gezielten Reduktion der Stoffflussgeschwindigkeit im Verzahnungsbereich, wodurch das lokale Vorseilen des Materialflusses bei Umformung von AlMgSi1 T6 vermieden und eine deutlich gesteigerte Formfüllung erzielt wird. Aufgrund der Umlenkung des Stoffflusses in den Bereich der Zahnflanke werden die Umformgrade lokal erhöht, wodurch eine erhöhte Härte und Verschleißfestigkeit zu erwarten ist. Da lediglich eine Materialflussumlenkung und keine zusätzliche Fließbehinderung eingebracht wird, steigen die erforderlichen Prozesskräfte nicht an. Aus diesem Grund werden die elastische Auffederung und die Werkzeugbeanspruchung nicht negativ beeinflusst. Ein Flankenwinkel von  $90^\circ$  stellt somit einen geeigneten Stellhebel dar, um die einsatzrelevanten Bauteileigenschaften fließgepresster Zahnräder, insbesondere aus Aluminium, gezielt zu verbessern.

## 8 Verifizierung und wissenschaftliche Bewertung der Erkenntnisse

In Kapitel 6 wurden Zusammenhänge zwischen den umforminduzierten Bauteileigenschaften fließgepresster Zahnräder und dem Verschleißverhalten der Materialpaarung ermittelt. Aufbauend auf den Anforderungen an die einsatzrelevanten Eigenschaften wurden in Kapitel 7 numerisch halbzeugseitige Einflussgrößen auf den Fließpressprozess zur Verzahnungsherstellung untersucht und werkzeugseitige Stellhebel zur gezielten Beeinflussung der einsatzrelevanten Bauteileigenschaften ermittelt (Bild 66). Ziel dieses Kapitels ist es, die numerisch identifizierten Wirkzusammenhänge experimentell zu verifizieren und die Auswirkung der veränderten Bauteileigenschaften auf das Verschleißverhalten zu überprüfen. Hierdurch wird die Übertragbarkeit der Erkenntnisse sichergestellt, um abschließend anwendungsgerechte Empfehlungen für die Herstellung betriebsangepasster metallischer Zahnräder für die Materialpaarung Metall-Kunststoff durch Kaltfließpressen abzuleiten.

Zunächst erfolgt die Verifizierung der Methoden zur betriebsangepassten Herstellung von Zahnrädern im Fließpressprozess durch experimentelle Umsetzung und den Abgleich der veränderten Bauteileigenschaften. Anschließend wird das Betriebsverhalten der angepassten Zahnräder in der Materialpaarung untersucht und das Auftreten der in Kapitel 6 identifizierten Verschleißmechanismen analysiert. Zudem wird die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf Zahnradpaarungen mit hoher Tragfähigkeit überprüft. Hierzu wird ein glasfaserverstärktes Kunststoffrad mit gesteigerter Festigkeit in einem Lastfall mit erhöhtem Drehmoment und erhöhter Drehzahl untersucht.

### 8.1 Gezielte Beeinflussung der Bauteileigenschaften

Im Folgenden werden Umformversuche durchgeführt, um die numerisch identifizierten Einflussgrößen und Stellhebel auf den Fließpressprozess experimentell zu verifizieren. Der Abgleich der numerisch und experimentell ermittelten Bauteileigenschaften erfolgt für alle drei Zahnradwerkstoffe 16MnCr5+A, CuZn37+C und AlMgSi T6, um die Übertragbarkeit auf verschiedene metallische Werkstoffe sicherzustellen. Darüber hinaus wird die Oberflächentopografie der Zahnflanke ermittelt, die Aufschluss über den Kontaktdruck im Werkzeug gibt [102], aber im virtuellen Prozessmodell nicht vorhergesagt werden kann.

### 8.1.1 Geometrische Abweichung des Rohlingdurchmessers

In den numerischen Untersuchungen in Kapitel 7 wurde gezeigt, dass Abweichungen des Rohlingdurchmessers das Prozessergebnis beeinflussen. Es wurden Auswirkungen auf den Stofffluss sowie den Werkzeugkontakt identifiziert und Wirkzusammenhänge ermittelt. Zur experimentellen Verifizierung der Erkenntnisse werden Umformversuche mit einer variierenden Toleranzlage des Rohlingdurchmessers (Tabelle 6) durchgeführt. Überprüft wird neben einem Durchmesser nahe des Sollmaßes (IT7), sowohl ein erhöhtes negatives (IT11 -), als auch ein positives (IT11 +) Abmaß. Größere Abweichungen werden aufgrund der identifizierten, kritischen Werkzeugbeanspruchung nicht untersucht.

#### Auswirkung auf die Formfüllung

Nachfolgend wird der Einfluss des Rohlingdurchmessers auf die Formfüllung überprüft. Bild 67 zeigt einen Abgleich der numerischen und experimentellen Ergebnisse. Gegenüber einem nahezu idealen Rohlingdurchmesser (IT7) werden die Abnahme der Formfüllung bei negativem sowie eine erhöhte Formfüllung bei einem positiven Abmaß experimentell bestätigt.

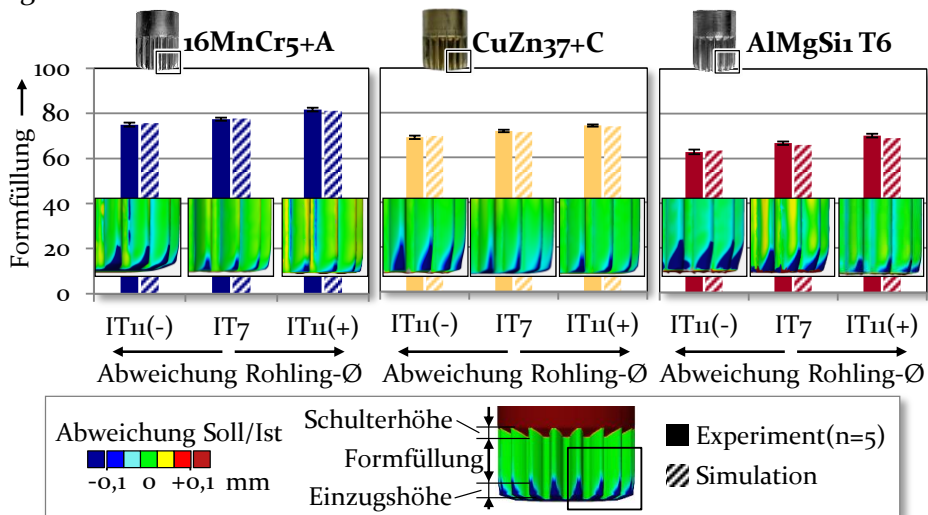


Bild 67: Verifikation des Einflusses des Rohlingdurchmessers auf die Formfüllung

Die Formfüllung erhöht sich für 16MnCr5+A von 75,0 % (IT11 -) auf 81,7 % (IT11 +), für CuZn37+C von 69,1 % auf 74,3 % und für AlMgSi1 T6 von 62,9 % auf 70,2 %. Der 3D-Abgleich zeigt, dass dies durch eine Reduzierung des Einzugsbereichs bedingt wird, die auf den früheren Beginn der Umfor-

mung bereits im Matrizenlaufbereich zurückzuführen ist. Der werkstoffspezifische Einzug in der Bauteilmitte bei den aus AlMgSi1 T6 fließgepressten Zahnrädern wird durch einen abweichenden Rohlingdurchmesser nicht beeinflusst. Die experimentellen Ergebnisse verifizieren somit die numerischen Untersuchungen.

### Auswirkung auf die Verzahnungsgenauigkeit

In Bild 68 ist der Einfluss der Toleranzlage des Rohlingdurchmessers auf die Verzahnungsgenauigkeit dargestellt. Ausgewertet werden die Profil- und Flankenlinien-Gesamtabweichungen. Der numerisch ermittelte Anstieg der Profil-Gesamtabweichungen bei einem Materialübermaß des Rohlingdurchmessers sowie die Reduzierung bei einem Materialdefizit wird für alle Werkstoffe durch die experimentellen Ergebnisse gestützt.

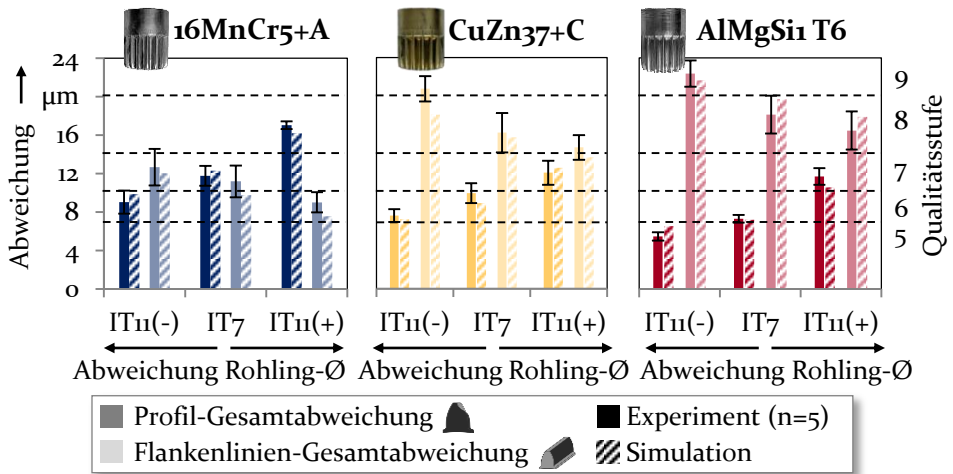


Bild 68: Verifikation des Einflusses des Rohlingdurchmessers auf die Verzahnungsgenauigkeit

Bei einer Toleranzlage des Rohlingdurchmesser von IT11 (+) wird die Qualität des Profils um ein bis zwei Stufen gegenüber IT11 (-) verschlechtert. Auch der Einfluss der Toleranzlage auf die Flankenlinien-Gesamtabweichungen wird verifiziert. Die bereits in Bild 67 festgestellte erhöhte Formfüllung bei einem positiven Abmaß (IT11 +) führt zu einer verbesserten Qualitätsstufe der Flankenlinie.

Die Toleranzlage des Rohlingdurchmessers wirkt sich unmittelbar auf die Verzahnungsgenauigkeit aus, wobei Abweichungen von Profil und Flanke gegenläufig beeinflusst werden. Dies bestätigt auch die in Kapitel 7 identifizierten Einflüsse der Matrizenauflfederung und Formfüllung auf die Genauigkeit von Profil (Bild 48) und Flankenlinie (Bild 49).

### Auswirkung auf die Zahnflankentopografie

Die resultierende Topografie der Zahnflanken ist in Bild 69 dargestellt. Da in Vorarbeiten [102] der Einfluss der Prozesskraft auf die Einglättung der Oberfläche identifiziert wurde, werden die numerisch und experimentell ermittelten Prozesskräfte ebenfalls ausgewertet.

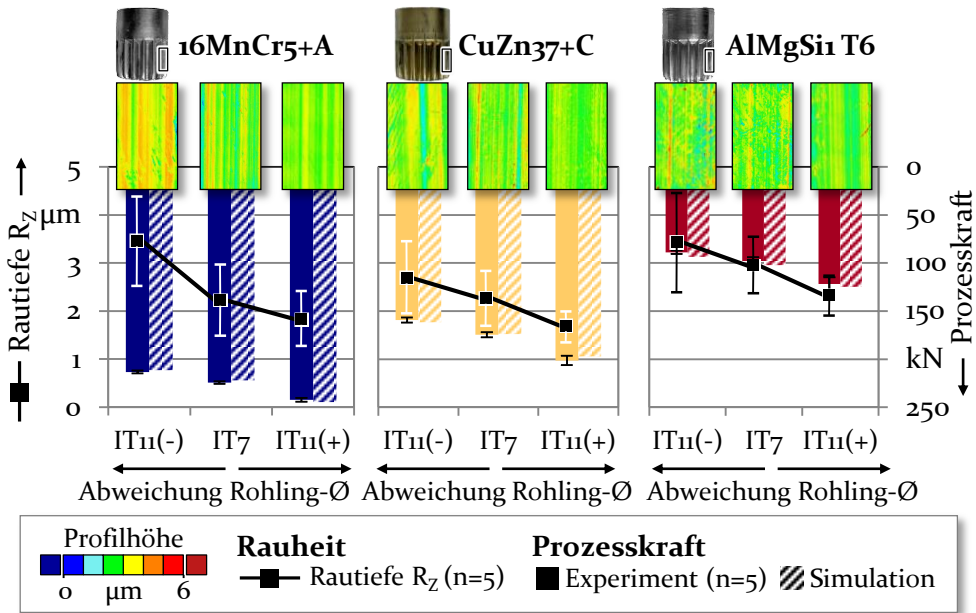


Bild 69: Verifikation des Einflusses des Rohlingdurchmessers auf die Oberfläche

Trotz vergleichbarer Topografie der Rohlingsoberfläche vor der Umformung ( $R_z 5,79 \pm 1,82 \mu\text{m}$ ) führt ein abweichender Rohlingdurchmesser zu einer deutlich variierenden Rautiefe der fließgepressten Zahnflanken. Ein durch die Toleranzlage bedingtes Materialübermaß bewirkt eine reduzierte Rautiefe  $R_z$  der Zahnflanke. Die Rautiefe  $R_z$  verringert sich für 16MnCr5+A von  $3,46 \pm 1,10 \mu\text{m}$  (IT11 -) auf  $1,85 \pm 0,58 \mu\text{m}$  (IT11 +), für CuZn37+C von  $2,68 \pm 0,79 \mu\text{m}$  auf  $1,67 \pm 0,31 \mu\text{m}$  und für AlMgSi1 T6 von  $3,43 \pm 1,03 \mu\text{m}$  auf  $2,32 \pm 0,42 \mu\text{m}$ .

Die reduzierte Rautiefe wird auf eine Einglättung der Oberfläche durch einen erhöhten Kontaktdruck in der Matrize zurückgeführt. Die Einglättung erfolgt axial in Umformrichtung und bewirkt eine zunehmende Vorzugsrichtung sowie eine reduzierte Streuung der Rauheitswerte. Das Auftreten eines durch das Materialübermaß bedingten gesteigerten Kontaktdrucks, der in Bild 60 beschrieben wurde, wird sowohl durch die numerischen als auch die experimentell ermittelten Prozesskräfte bestätigt. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen

maximaler Prozesskraft und Einglättung der Oberfläche, der auch von GROCHE ET AL. bei Variation der tribologischen Bedingungen identifiziert wurde [11]. Die geringste Rautiefe  $1,85 + 0,58 \mu\text{m}$  resultiert bei Umformung von 16MnCr5+A bei einem Rohlingdurchmesser im Bereich von IT<sub>11</sub> (+), was auf die hohe maximale Prozesskraft zurückzuführen ist. Die Rautiefe liegt im Bereich der Rauheit der Matrizenoberfläche ( $R_z 1,46 \pm 0,07 \mu\text{m}$ ), weshalb nicht von einer weiteren Reduzierung bei erhöhtem Kontaktdruck auszugehen ist. Die Ergebnisse belegen, dass eine Berücksichtigung der Toleranzlage des Rohlings zur Erzielung reproduzierbarer Zahnflankentopografien erforderlich ist.

### 8.1.2 Flankenwinkel der Fließpressmatrize

In Kapitel 7 wurde die Adaption der Werkzeuggeometrie um einen Flankenwinkel zur gezielten Steigerung der lokalen Zahnflankenhärte numerisch identifiziert (Bild 61). Zur Verifizierung der Methode werden experimentelle Umformversuche auf Grundlage der numerischen Ergebnisse gefertigten Fließpressmatrizen mit  $0^\circ$  (Referenz),  $45^\circ$  und  $90^\circ$  Flankenwinkel durchgeführt.

#### Auswirkung auf die Formfüllung

Zunächst wird die numerisch ermittelte Auswirkung des Flankenwinkels auf die Materialausnutzung überprüft. Bild 70 zeigt einen Abgleich der numerisch und experimentelle bestimmten Formfüllung.

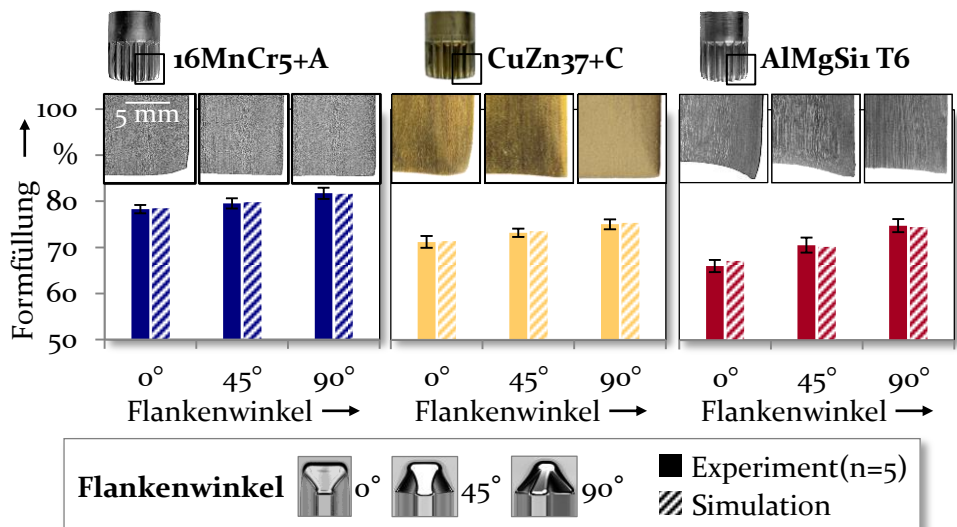


Bild 70: Verifikation des Einflusses des Flankenwinkels auf die Formfüllung

Die verbesserte Formfüllung bei einem zunehmenden Flankenwinkel wird durch die experimentellen Ergebnisse bestätigt. Die Formfüllung erhöht sich für 16MnCr5+A von 78,3 % (0°) auf 81,7 % (90°), für CuZn37+C von 71,3 % (0°) auf 75,1 % (90°) sowie für AlMgSi T6 von 66,1 % (0°) auf 74,8 % (90°). Anhand der Gefügeaufnahmen ist zu erkennen, dass das Vorseilen des Materialflusses im Verzahnungsbereich bei der Umformung von AlMgSi T6 durch den Flankenwinkel reduziert wird. Die numerisch identifizierte Stoffflussumlenkung wird somit auch experimentell nachgewiesen.

### Auswirkung auf die Zahnflankenhärte

In Bild 71 wird der Einfluss des Flankenwinkels auf die Verfestigung der Zahnflanke durch Abgleich der experimentellen und numerischen Daten überprüft. Die Mikrohärtigkeit wird der mittels des virtuellen Prozessmodells ermittelten Fließspannung im Bereich der Zahnflanke gegenübergestellt.

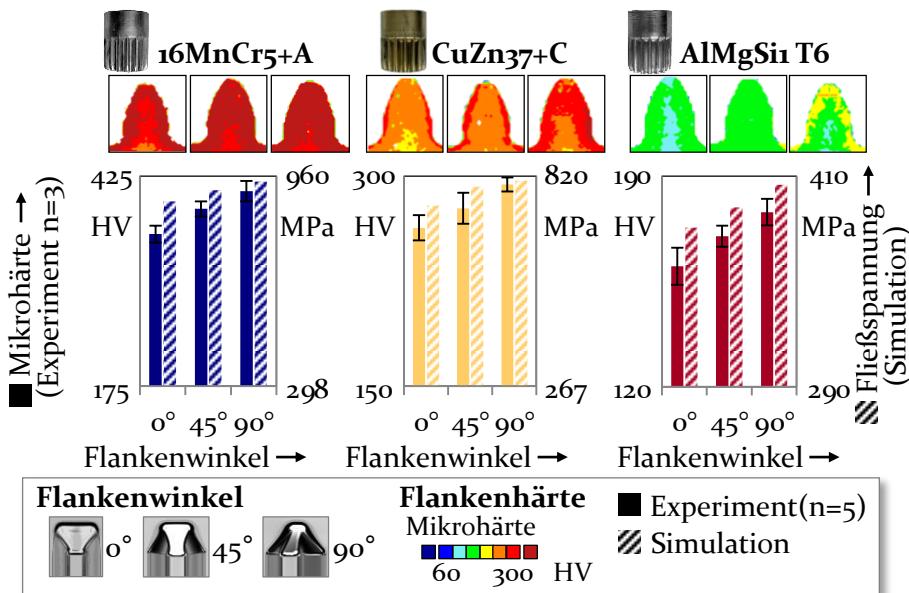


Bild 71: Verifikation des Einflusses des Flankenwinkels auf die Verfestigung der Zahnflanke

Die Skalierung der Diagramme erfolgt jeweils ausgehend von der Grundhärtigkeit und Anfangsfließspannung des Materials bis zur maximal ermittelten Härte und Sättigungsfließspannung. Es zeigt sich für alle Werkstoffe eine gute Korrelation zwischen numerisch identifiziertem Anstieg der lokalen Fließspannung und experimentell gemessener Mikrohärtigkeit. Das virtuelle Prozessmodell ermöglicht somit eine zuverlässige, qualitative Vorhersage der Verfestigung der Zahnflanke. Die Mikrohärtigkeit erhöht sich gegenüber

der Referenz ( $0^\circ$  Flankenwinkel) für den Werkstoff 16MnCr5+A um 14 % auf  $407 \pm 11$  HV ( $90^\circ$ ), für CuZn37+C um 12 % auf  $294 \pm 5$  HV sowie für AlMgSi1 T6 um 11 % auf  $178 \pm 4$  HV ( $90^\circ$ ).

Der Anstieg der lokalen Verfestigung bestätigt die gezielte Stoffflussumlenkung in den Bereich der Zahnflanke (Bild 61). Aufgrund der Vorverfestigung und des reduzierten Verhältnisses der Sättigungs- zur Anfangsfließspannung ( $k_{f,s}/k_{f,o}$ ) (Bild 7) fällt die Zunahme der Mikrohärtigkeit bei AlMgSi1 T6 gegenüber 16MnCr5+A und CuZn37+C geringer aus.

### Auswirkung auf die Verzahnungsgenauigkeit

Die Auswirkung des Flankenwinkels auf die Verzahnungsqualität wird in Bild 72 experimentell verifiziert. Dargestellt sind die experimentell und numerisch ermittelten Genauigkeiten von Profil und Flankenlinie. Die Messungen bestätigen, dass durch die Anpassung der Werkzeuggeometrie die Profilabweichungen nicht beeinflusst werden. Dies stützt die numerischen Ergebnisse, die keine Auswirkung des Flankenwinkels auf die Prozesskräfte und Matrizenauflfederung identifiziert haben (Bild 62).

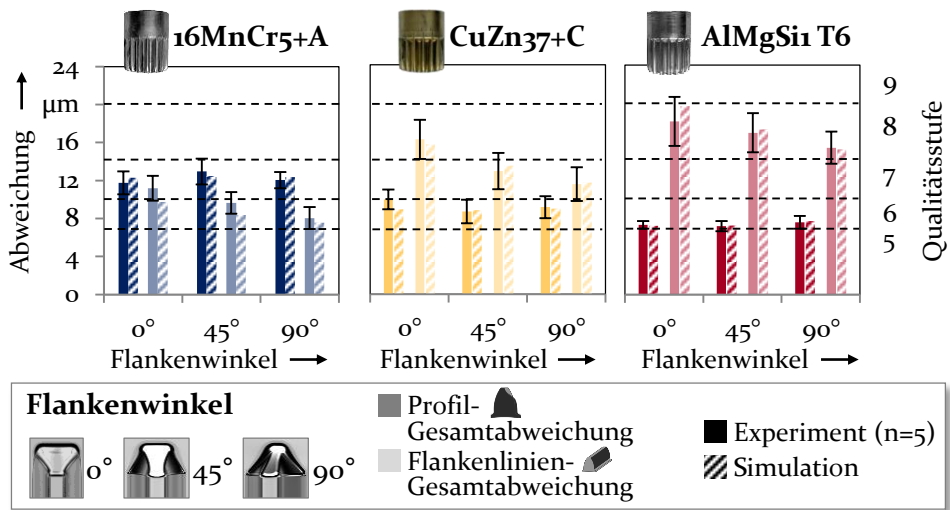


Bild 72: Verifikation des Einflusses des Flankenwinkels auf die Verzahnungsgenauigkeit

Dagegen werden reduzierte Flankenlinienabweichungen mit zunehmendem Flankenwinkel nachgewiesen. Diese sind auf die bereits in Bild 70 nachgewiesene, verbesserte Formfüllung zurückzuführen. Die Verzahnungsqualität der Flankenlinie, die aufgrund der hohen Abweichungen gegenüber dem Profil maßgeblich ist, verbessert sich je Werkstoff um eine Stufe.

### Auswirkung auf die Zahnflankentopografie

In Bild 73 wird der Einfluss der adaptierten Matrizengeometrie auf die Prozesskräfte und Oberflächenrauheit der Zahnflanken überprüft. Die Umformversuche stützen die numerischen Untersuchungen, in denen kein Einfluss des Flankenwinkels auf die erforderliche maximale Prozesskraft festgestellt wurde. Dies wird auch durch die Auswertung der Oberfläche bestätigt, da die Zahnräder eine weitgehend vergleichbare Topografie sowie Rautiefe  $R_z$  aufweisen, was auf einen gleichbleibenden Kontaktdruck in der Matrize hinweist.

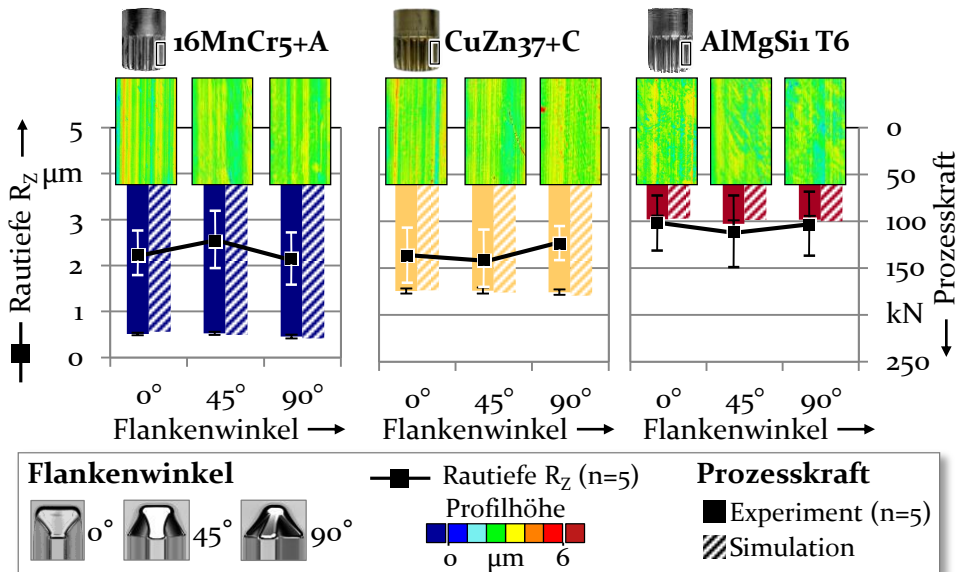


Bild 73: Verifikation des Einflusses des Flankenwinkels auf Prozesskraft und Oberfläche

Die reproduzierbare Oberflächenqualität zeigt, dass die zusätzliche Stoffflussumlenkung nicht zum Versagen des Schmierfilms aufgrund erhöhter tribologischer Beanspruchung führt [143]. Tendenziell resultieren bei der Umformung von AlMgSi1 T6 höhere Rauheitswerte, was auf das insgesamt deutlich reduzierte Kraftniveau zurückgeführt wird.

Mit Hilfe der experimentellen Untersuchungen wurden die in Kapitel 7 numerisch identifizierten Wirkzusammenhänge verifiziert. Zudem wurde die hohe Prognosegüte des virtuellen Prozessmodells für alle eingesetzten Metallwerkstoffe und auch für variierende Halbzeug- und Werkzeuggeometrien bestätigt. Gegenüber bisherigen Untersuchungen [14] wird eine präzise Vorhersage der einsatzrelevanten Bauteileigenschaften, insbesondere

der Verzahnungsgenauigkeit und lokalen Zahnflankenhärte erreicht. Anhand der Erkenntnisse wird die gezielte Beeinflussung der einsatzrelevanten Bauteileigenschaften durch Berücksichtigung der Toleranzlage des Rohlingdurchmessers und Adaption des Flankenwinkels möglich, um ein verbessertes Verschleißverhalten zu erzielen.

## **8.2 Verifizierung des veränderten Verschleißverhaltens**

Nachfolgend werden die in Kapitel 6 identifizierten Einflüsse der umforminduzierten Bauteileigenschaften auf das Verschleißverhalten und die erarbeiteten Wirkzusammenhänge verifiziert. Hierzu werden die im Rahmen von Abschnitt 8.1 fließgepressten Zahnräder mit angepassten Bauteileigenschaften eingesetzt, und das resultierende Verschleißverhalten am Getriebeprüfstand untersucht sowie die auftretenden Verschleißmechanismen analysiert. Um die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf Zahnradpaarungen mit höherer Tragfähigkeit sicherzustellen, erfolgt die Überprüfung der identifizierten Zusammenhänge sowohl in der Paarung mit dem bisher untersuchten Polymerwerkstoff PA66 als auch bei Einsatz des glasfaserverstärkten PA66 GF30 bei einem erhöhten Lastfall.

### **8.2.1 Erhöhte Zahnflankenhärte**

Im Folgenden wird geprüft, ob die gezielt erhöhte Zahnflankenhärte das Auftreten der abrasiven Verschleißmechanismen und die Transferfilmbildung beeinflusst. Durch Adaption der Fließpressmatrize wird eine deutlich gesteigerte Festigkeit der Messing- und Aluminiumritzel gegenüber der konventionellen Herstellung und Wärmebehandlung erreicht (Bild 71). Entsprechend der in Bild 44 identifizierten Zusammenhänge wird erwartet, dass in der Paarung mit PA66 aufgrund der umforminduzierten Verfestigung eine reduzierte Abrasion und Aufrauung der metallischen Flanke resultiert, wodurch der metallische Verschleiß und die abrasive Wirkung auf das Polymerrad verringert werden. Zudem wird überprüft, ob im Gegensatz zu den im Referenzprozess fließgepressten CuZn<sub>37</sub>+C und AlMgSi<sub>1</sub> T6 Ritzeln (Bild 34) die Ausbildung eines verschleißmindernden Transferfilms ermöglicht wird. Anhand der Ergebnisse sollen die Erkenntnisse aus Kapitel 6 verifiziert und die Einsatzmöglichkeiten der Werkstoffe, insbesondere von Aluminium, gegenüber dem Stand der Technik erweitert werden.

### Auswirkung auf das Verschleißverhalten

Das Verschleißverhalten bei Einsatz der im Referenzprozess fließgepressten sowie der mit angepasstem Flankenwinkel hergestellten Metallritzel in der Paarung mit PA66 wird in Bild 74 gegenübergestellt.

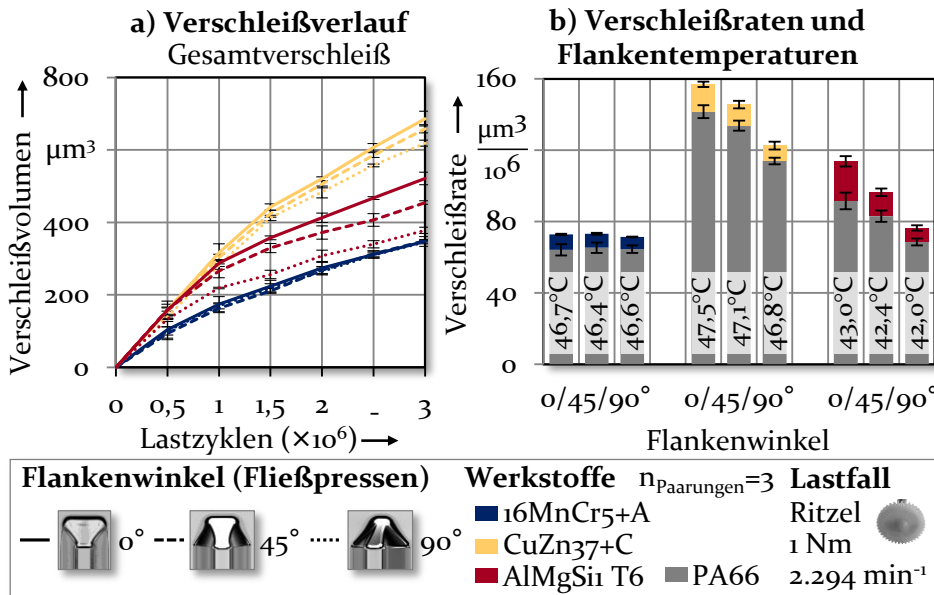


Bild 74: Verschleißverlauf (a) und stationärer Verschleiß (b) bei Variation des Flankenwinkels (Paarung Metall-PA66)

Sowohl der Verlauf des Gesamtverschleißes (Bild 74 a) als auch die stationären Verschleißraten (b) zeigen einen signifikanten Einfluss der gesteigerten umforminduzierten Verfestigung bei Einsatz von CuZn37+C und AlMgSi1 T6. Der Gesamtverschleiß (Bild 74 a) nach  $3,0 \times 10^6$  Lastzyklen wird bei der Paarung CuZn37+C-PA66 von  $686,6 \pm 20,1 \mu\text{m}^3$  (Referenz) auf  $658,5 \pm 11,5 \mu\text{m}^3$  (45°) sowie  $618,9 \pm 7,9 \mu\text{m}^3$  (90° Flankenwinkel) reduziert.

Bei Einsatz von AlMgSi1 T6 verringert sich dieser von  $521,7 \pm 17,4 \mu\text{m}^3$  (Referenz) auf  $454,9 \pm 4,5 \mu\text{m}^3$  (45°) und  $378,2 \pm 8,6 \mu\text{m}^3$  (90° Flankenwinkel). Im Gegensatz dazu ergibt sich bei Verwendung der fließgepressten Stahlritzel ein vergleichbarer Verschleißverlauf für die Variation des Flankenwinkels, wobei die Unterschiede im Bereich der Standardabweichung liegen.

Das unveränderte Verschleißverhalten der Paarung 16MnCr5+A-PA66 wird auch durch gleichbleibende stationäre Verschleißraten von Ritzel und Rad

sowie konstante Zahnflankentemperaturen bestätigt (Bild 74 b). Bei Einsatz der im adaptierten Prozess hergestellten CuZn<sub>37</sub>+C und AlMgSi<sub>1</sub> T6 Ritzel werden die Verschleißraten beider Zahnräder dagegen wesentlich reduziert. Gegenüber der Referenz (0°) verringern sich diese bei 90° Flankenwinkel in der Paarung CuZn<sub>37</sub>+C-PA66 von  $14,4 \pm 1,5 \mu\text{m}^3/10^6$  (CuZn<sub>37</sub>+C) um 40 % auf  $8,6 \pm 2,2 \mu\text{m}^3/10^6$  sowie von  $143,6 \pm 3,6 \mu\text{m}^3/10^6$  (PA66) um 20 % auf  $114,0 \pm 1,8 \mu\text{m}^3/10^6$ . Die Abnahme ist am deutlichsten bei Einsatz der angepassten AlMgSi<sub>1</sub> T6 Ritzel. Die Verschleißraten werden von  $22,2 \pm 2,9 \mu\text{m}^3/10^6$  (AlMgSi<sub>1</sub> T6) um 65 % auf  $7,8 \pm 1,5 \mu\text{m}^3/10^6$  und von  $91,6 \pm 4,6 \mu\text{m}^3/10^6$  (PA66) um 25 % auf  $68,6 \pm 1,9 \mu\text{m}^3/10^6$  verringert. Das verbesserte Verschleißverhalten wird auch anhand der reduzierten Zahnflankentemperaturen (Bild 74 b) belegt.

Die Auswertung der metallischen Zahnkontur mit Hilfe von Schlibbildern (Bild 75) bestätigt die Reduktion des Verschleißes der CuZn<sub>37</sub>+C als auch AlMgSi<sub>1</sub> T6-Ritzel bei einem Flankenwinkel von 90°. Zudem ist die erhöhte Verfestigung der Zahnflanke bei zunehmendem Flankenwinkel anhand einer Vergrößerung des Randbereichs, welcher gestreckte Körner und eine faserähnliche Struktur aufweist, erkennbar. Demgegenüber liegen in Richtung Zahnradmitte größere Körner mit geringerer Deformation vor.

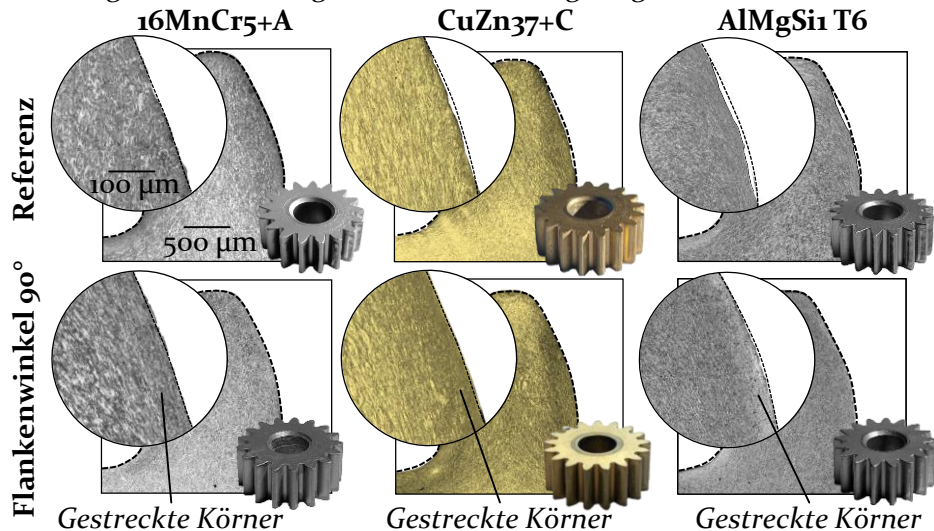


Bild 75: Verschlossene Zahnkontur bei Variation des Flankenwinkels (Paarung PA66)

Nachfolgend wird der Einfluss der gezielt erhöhten, umforminduzierten Verfestigung in der Paarung mit dem glasfaserverstärktem Polyamid PA66 GF30 bei einem erhöhten Lastfall von 2 Nm und  $4588 \text{ min}^{-1}$  untersucht. Bild 76 zeigt den Verschleißverlauf (a) und die stationären Verschleißraten (b) bei der Referenz sowie 90° Flankenwinkel. Bei Einsatz aller

drei Metallwerkstoffe tritt ein linearer Verschleißverlauf auf (Bild 76 a). Zudem ist eine deutliche Abnahme des Verschleißes bei erhöhter umform-induzierter Zahnflankenhärte zu erkennen.

Die Auswertung der Verschleißraten von Ritzel und Rad (Bild 76 b) zeigt, dass in der Paarung von 16MnCr5+A mit dem glasfaserverstärkten PA66 GF30 hoher Verschleiß am Polymerrad resultiert. Dagegen tritt bei Einsatz von CuZn37+C und AlMgSi11 T6 überwiegend metallischer Verschleiß auf, der die Lebensdauer der Paarung begrenzt. Bei Einsatz der mit 90° Flankenwinkel fließgepressten Ritzel wird gegenüber der Referenz in der Paarung 16MnCr5+A - PA66 GF30 sowohl der Verschleiß des Ritzels als auch des Rads um 41 % auf  $20,9 \pm 4,8 \mu\text{m}^3/10^6$  sowie um 34 % auf  $89,0 \pm 7,9 \mu\text{m}^3/10^6$  reduziert.

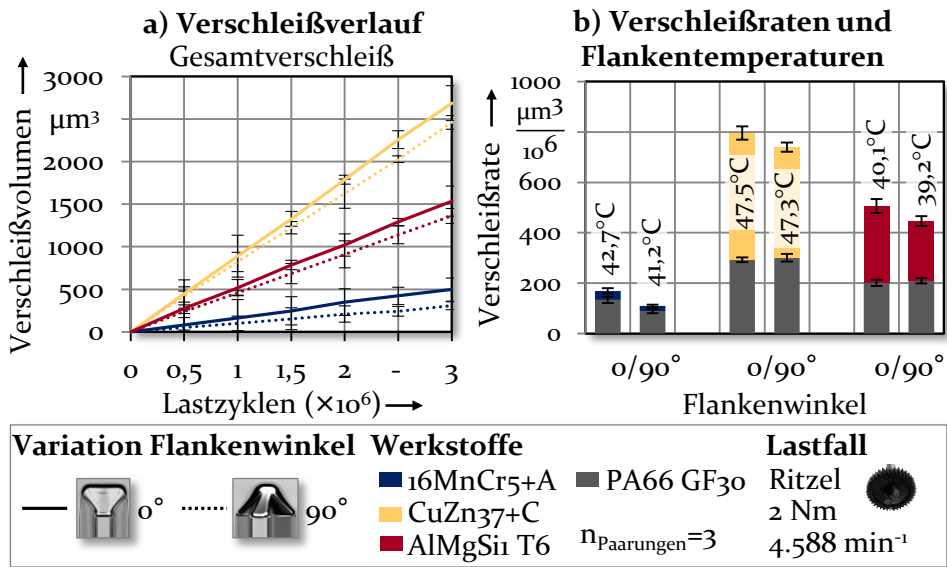


Bild 76: Verschleißverlauf (a) und stationärer Verschleiß (b) bei Variation des Flankenwinkels (Paarung Metall-PA66 GF30)

Erkennbar ist, dass der Verschleiß des Polymerrads bei gesteigerter Flanken-härte der Messing- und Aluminiumritzel geringfügig erhöht wird. Maß-geblich ist aber die Reduktion des metallischen Verschleißes, der in der Paarung mit CuZn37+C um 13 % auf  $438,9 \pm 18,4 \mu\text{m}^3/10^6$  und bei AlMgSi11 T6 um 21 % auf  $236,6 \pm 19,6 \mu\text{m}^3/10^6$  verringert wird. Die Abnahme des insgesamt auftretenden Verschleißes wird auch durch reduzierte Flan-kentemperaturen bestätigt, die auf eine reduzierte Verlustwärme in der

Paarung hindeuten. Maximale Verschleißraten und Temperaturen resultieren jeweils bei Einsatz der Messingritzel, was den Ergebnissen in der Paarung mit PA66 (Bild 46) entspricht.

Der verringerte metallische Verschleiß ist anhand der Schliffbilder der verschlissenen Zahnkonturen in Bild 77 feststellbar. Bei den mit  $90^\circ$  Flankenwinkel fließgepressten 16MnCr5+A Ritzeln tritt kein wesentlicher Verschleiß mehr auf. Die Adaption des Umformprozesses führt zwar auch bei den Messing- sowie Aluminiumritzeln zu einer maßgeblichen Reduktion des Verschleißes, es tritt aber weiterhin, insbesondere bei CuZn37+C, eine Schädigung der Form der Zahnflanke auf. Minimaler Verschleiß resultiert im Bereich des Wälzpunkts, was den in Bild 37 identifizierten Zusammenhang zwischen lokaler Beanspruchung und lokalem Verschleiß bestätigt.

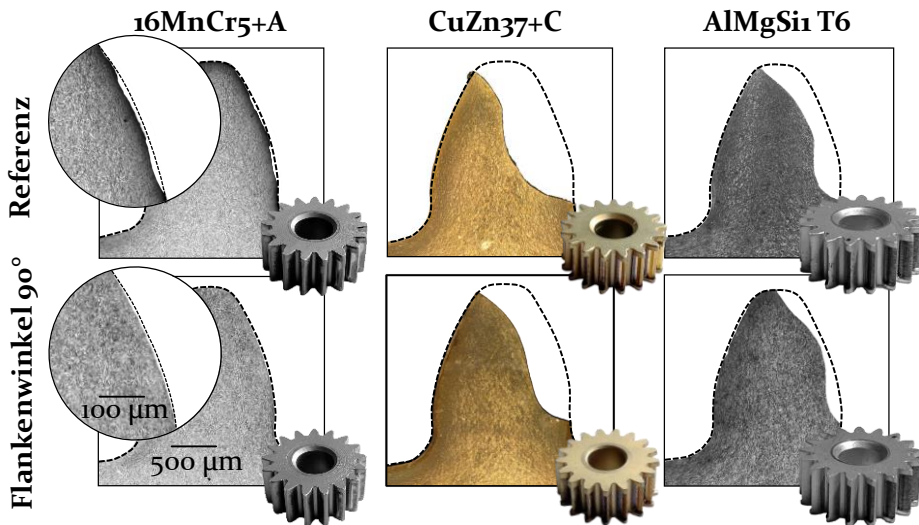


Bild 77: Verschlossene Zahnkontur bei Adaption des Flankenwinkels (Paarung PA66 GF30)

### Verschleißbedingte Oberflächentopografie

Das verbesserte Verschleißverhalten der Messing- und Aluminiumritzel in der Paarung mit PA66 wird auf eine, in Folge der lokal gesteigerten Härte reduzierte Aufrauung und 2-Körper-Abrasion der Zahnflanke zurückgeführt (Bild 45). Zur Verifikation des in Bild 44 identifizierten Zusammenhangs wird in Bild 78 die Veränderung der Topografie und Rautiefe  $R_z$  der mit angepassten Flankenwinkeln hergestellten Metallritzel zunächst für die Paarung mit PA66 ausgewertet.

Die Zahnflanken der 16MnCr5+A-Ritzeln weisen nach den Verschleißversuchen vergleichbare Topografien (Bild 78 a) und Rauheitswerte (Bild 78 b) auf. Gegenüber dem Ausgangszustand der Oberfläche ( $R_z = 5,10 \pm 0,63 \mu\text{m}$ )

wird diese bei allen Stahlritzeln geglättet. Dies wird durch die hohe Verschleißfestigkeit der Zahnflanke bedingt, weshalb keine Abrasion auftritt, sondern lediglich die im Ausgangszustand vorhandenen Rauheitsspitzen eingeebnet werden. Somit werden die Ergebnisse aus Bild 43 bestätigt, die aufgrund der bereits im Referenzprozess hohen Härte (356 HV) eine Einglättung der Oberfläche analog zu den einsatzgehärteten 16MnCr5+A Ritzeln (451 HV) zeigten. Es ist kein Einfluss einer Erhöhung der Verfestigung auf die Topografie festzustellen, was auf die Ausbildung eines Transferfilms (Bild 79) bei allen fließgepressten Stahlritzeln zurückgeführt wird.

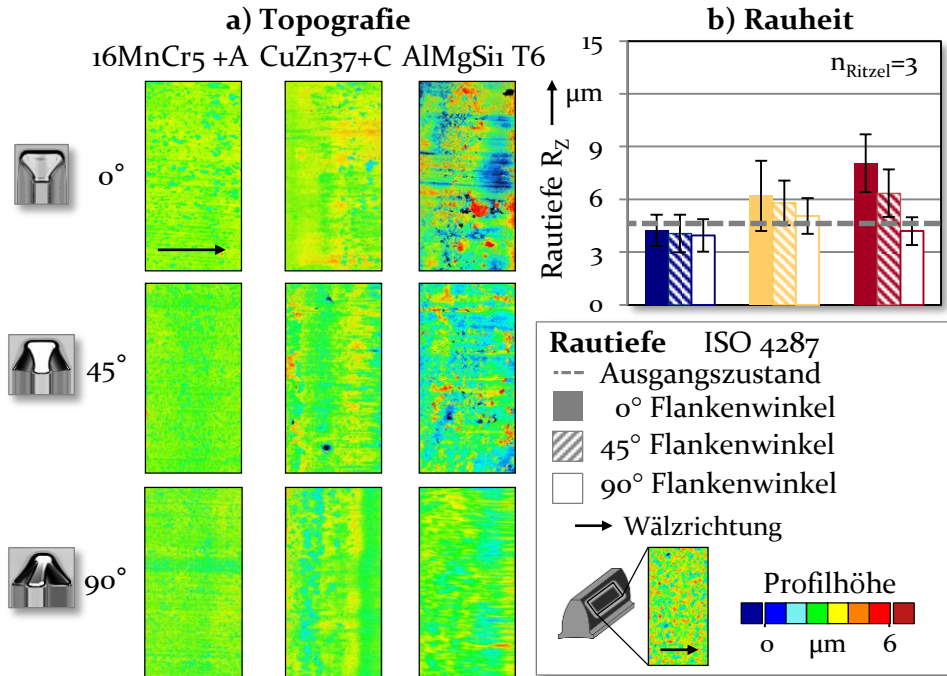


Bild 78: Veränderung der a) Topografie und b) Rautiefe infolge Verschleiß bei Variation des Flankenwinkels (Paarung PA66)

Die Abrasion der Oberfläche der CuZn37+C-Ritzeln in der Paarung mit PA66 wird bei Vergrößerung des Flankenwinkels aufgrund der erhöhten Zahnflankenhärte geringfügig reduziert. Dies wird auch durch Auswertung der  $R_z$ -Werte bestätigt. Die reduzierte Abrasion bewirkt eine Abnahme des am Messingritzel auftretenden Verschleißes (Bild 74). Die Rautiefe der Zahnflanken liegt allerdings bei allen untersuchten CuZn37+C-Ritzeln oberhalb des Ausgangszustands ( $R_z > 5,10 \mu\text{m}$ ), was darauf hinweist, dass weiterhin Abrasion der Oberfläche auftritt und keine Ausbildung eines Transferfilms folgt. Die aufgeraute, metallische Oberfläche bewirkt 2-Körper-Abrasion (Bild 45) des Polymerrads. Durch die gesteigerte Zahnflankenhärte bei

Erhöhung des Flankenwinkels wird die Aufrauung geringfügig reduziert, wodurch auch die abrasive Wirkung der Oberfläche und der Verschleiß des Polymerrads verringert werden.

Bei Paarung der im angepassten Prozess fließgepressten AlMgSi1 T6 Ritzel mit PA66 tritt gegenüber der Referenz eine reduzierte Abrasion der Oberfläche auf, was den Einfluss einer erhöhten Zahnflankenhärte bestätigt. Die Rautiefe  $R_z$  wird von  $8,1 \pm 1,6 \mu\text{m}$  (Referenz) auf  $6,4 \pm 1,4 \mu\text{m}$  ( $45^\circ$ ) und  $4,2 \pm 0,8 \mu\text{m}$  ( $90^\circ$  Flankenwinkel) verringert. Bei den mit  $90^\circ$  Flankenwinkel fließgepressten Ritzeln resultiert aufgrund ausreichender Verschleißfestigkeit keine maßgebliche Abrasion mehr, und die Oberfläche wird gegenüber dem Ausgangszustand ( $R_z = 5,10 \pm 0,63 \mu\text{m}$ ) geglättet. Dies bewirkt eine reduzierte abrasive Wirkung der metallischen Oberfläche und einen verringerten Verschleiß des Polymerrads (Bild 74).

Die Untersuchungen stützen die Erkenntnisse aus Kapitel 6, wonach eine lokal gesteigerte Härte des Ritzels die Aufrauung der metallischen Zahnflanke reduziert und die abrasive Wirkung der Oberfläche auf das Polymerad aufgrund von 2-Körper-Abrasion (Bild 45) verringert. Die Adaption des Fließpressprozesses ist geeignet, das Einsatzpotential, insbesondere von Aluminium deutlich zu steigern. Analog zu den bisherigen Ergebnissen (Bild 44) wird bei Einsatz von Messing in der Paarung mit PA66 auch bei gesteigerter Härte gegenüber Stahl und Aluminium ein erhöhter Verschleiß festgestellt. Um die zugrundeliegenden Ursachen zu ermitteln, wird die Bildung eines Transferfilms auf den Oberflächen der mit  $90^\circ$  Flankenwinkel fließgepressten Ritzeln mittels EDX-Messung geprüft (Bild 79).

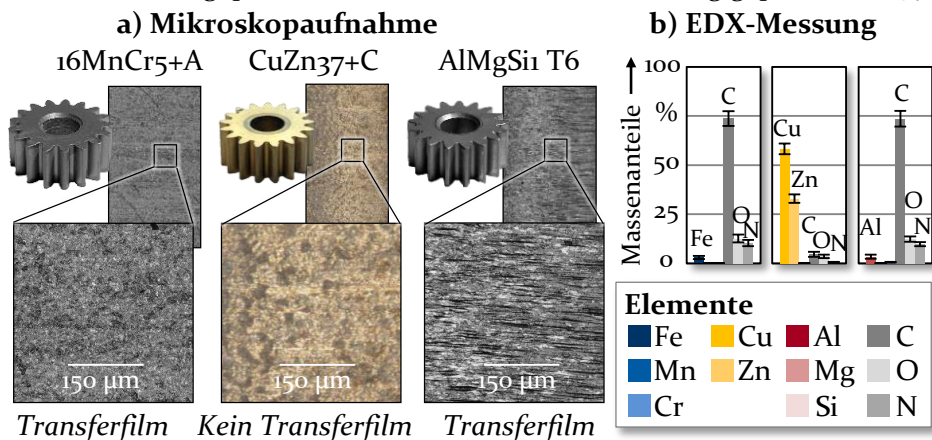


Bild 79: EDX-Analyse der mit  $90^\circ$  Flankenwinkel fließgepressten Ritzel (Paarung PA66)

Analog zu den Stahlritzeln aus dem Referenzprozess (Bild 34) wird für die mit 90° Flankenwinkel fließgepressten 16MnCr5+A Ritzel durch hohe Massenanteile von Kohlenstoff (73,7 %), Sauerstoff (12,7 %) und Stickstoff (10,4 %) die Bildung eines Transferfilms auf der Zahnflanke bestätigt. Trotz einer hohen Verschleißfestigkeit der Oberfläche und der Einglättung durch den Abbau von Rauheitsspitzen wird bei CuZn37+C keine Bildung eines Transferfilms festgestellt. Die EDX-Messung zeigt nur geringe Massenanteile des Polymerwerkstoffs (4,7 % Kohlenstoff, 3,6 % Sauerstoff, 0,5 % Stickstoff). Im Gegensatz dazu wird die Bildung eines Transferfilms auf der Aluminiumoberfläche nachgewiesen (73,6 % Kohlenstoff, 12,4 % Sauerstoff, 9,8 % Stickstoff-Massenanteile), wodurch der gegenüber dem Einsatz der Messingritzeln deutlich reduzierte Verschleiß bedingt wird. Das Fehlen des Transferfilms beim Einsatz der CuZn37+C-Ritzeln ist auf die geringere Adhäsionsneigung aufgrund der niedrigen Oberflächenenergie von Messing im Vergleich zu Stahl und Aluminium zurückzuführen [195], wodurch die Anhaftung von Polymerpartikeln nicht ermöglicht wird [196].

Bei Paarung der fließgepressten Ritzeln mit dem glasfaserverstärkten Polymerwerkstoff wurde hoher metallischer Verschleiß festgestellt (Bild 76). Bild 80 zeigt die Auswertung von Topografie und Rautiefe bei Variation des Flankenwinkels in der Paarung mit PA66 GF30.

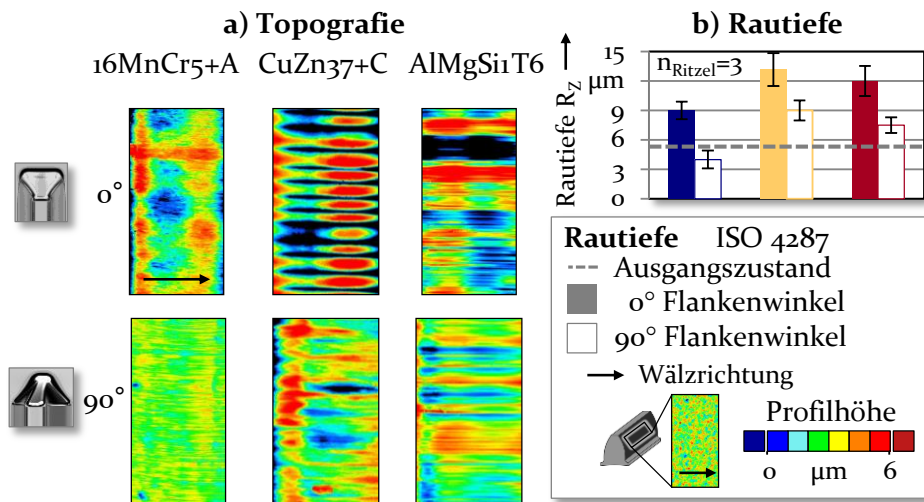


Bild 80: Veränderung der a) Topografie und b) Rautiefe infolge Verschleiß bei Variation des Flankenwinkels (Paarung PA66 GF30)

Bei allen im Referenzprozess fließgepressten Ritzeln tritt in der Paarung mit PA66 GF30 eine starke Abrasion der metallischen Oberfläche auf, was im Ausbrechen metallischer Partikel und 3-Körper-Abrasion resultiert. Ins-

besondere bei den CuZn<sub>37</sub>+C und AlMgSi<sub>11</sub> T6-Ritzeln sind Riefen in Wälzrichtung sowie eine Schädigung der Zahnflankenform erkennbar. Bei den im angepassten Prozess hergestellten 16MnCr<sub>5</sub>+A-Ritzeln sind Aufrauung und Abrasion der Zahnflanke dagegen deutlich reduziert. Gegenüber dem Ausgangszustand wird die Oberfläche eingeglättet und die Rautiefe verringert (Bild 80 b). Dies wird auf das Abtragen von Rauheitsspitzen zurückgeführt, weshalb 2-Körper-Abrasion resultiert. Aufgrund der abrasiven Wirkung der im Polymer beigemischten Glasfasern ist allerdings keine Transferfilmbildung möglich [51]. Bei CuZn<sub>37</sub>+C und AlMgSi<sub>11</sub> T6 ist eine reduzierte Aufrauung festzustellen, es tritt aber weiter starke Abrasion auf, die zum Ausbrechen metallischer Partikel und 3-Körper-Abrasion führt.

Die Adaption des Fließpressprozesses erweitert die Einsatzgrenzen von Aluminium und reduziert den Verschleiß wesentlich. Gegenüber den Untersuchungen von CHEN ET AL. [51] wird durch die lokal gesteigerte, umforminduzierte Verfestigung in der Paarung mit PA66 die Ausbildung eines verschleißmindernden Transferfilms ermöglicht. Weiterhin bestätigen die Ergebnisse die Übertragbarkeit der identifizierten Verschleißmechanismen auf den Einsatz faserverstärkter Polymerwerkstoffe unter höherer Beanspruchung. Aufgrund der erhöhten Festigkeit von PA66 GF<sub>30</sub> ist gegenüber der Paarung mit PA66 ein gesteigertes Härteniveau des Metallritzels erforderlich. 2-Körper-Abrasion ohne maßgeblichen metallischen Verschleiß resultiert nur bei Einsatz von Stahl, weshalb im Folgenden nur die Paarung Stahl-PA66 untersucht wird.

### 8.2.2 Umforminduzierte Oberflächentopografie

Aufgrund des Einflusses einer variierenden Toleranzlage des Rohlingdurchmesser auf den Stofffluss und Kontaktdruck während der Umformung resultiert eine veränderte Oberflächentopografie der fließgepressten Zahnräder (Bild 69). In der Paarung mit PA66 treten bei den im Referenzprozess hergestellten CuZn<sub>37</sub>+C und AlMgSi<sub>11</sub> T6-Ritzeln aufgrund der unzureichenden Festigkeit eine starke Abrasion der Oberfläche und hoher Verschleiß auf (Bild 33), weshalb kein Einfluss einer initial veränderten Topografie zu erwarten ist. Analog dazu resultiert bei Einsatz des glasfaserverstärkten PA66 GF<sub>30</sub> in der Paarung mit allen untersuchten Metallwerkstoffen Abrasion der Oberfläche (Bild 80), weswegen die Topografie im Ausgangszustand zu vernachlässigen ist.

Die Untersuchungen der Paarung 16MnCr<sub>5</sub>+A - PA66 im Modellversuch (Bild 23) zeigen, dass sich bei hoher Festigkeit der metallischen Ober-

fläche sowohl Rautiefe als auch Vorzugsrichtung wesentlich auf die auftretenden Verschleißmechanismen Adhäsion und Abrasion sowie die Transferfilmbildung auswirken. Vor diesem Hintergrund wird dieser Zusammenhang für die in Abschnitt 8.1.1 fließgepressten 16MnCr5+A-Ritzel mit variierender, umforminduzierter Zahnflankentopografie überprüft und im Referenzprozess fließgepressten Ritzeln mit abrasivgestrahlten Oberflächen gegenübergestellt.

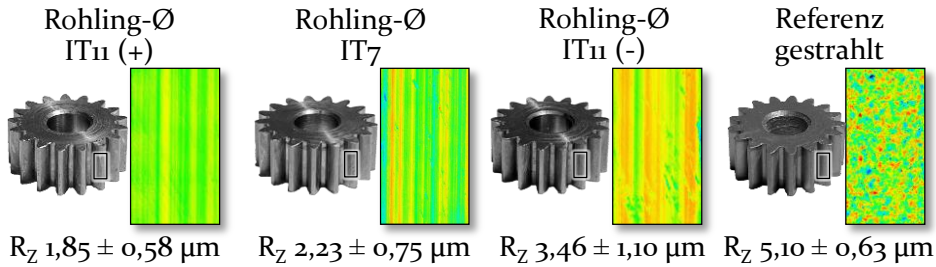


Bild 81: Variation der Topografie im Fließpressprozess und durch Abrasivstrahlen

### Auswirkung auf das Verschleißverhalten

In Bild 82 ist das experimentell ermittelte Verschleißverhalten dargestellt. Gezeigt werden der Verlauf des Gesamtverschleißes (a) und die stationären Verschleißraten (b) von Metallritzel und Polymerrad.

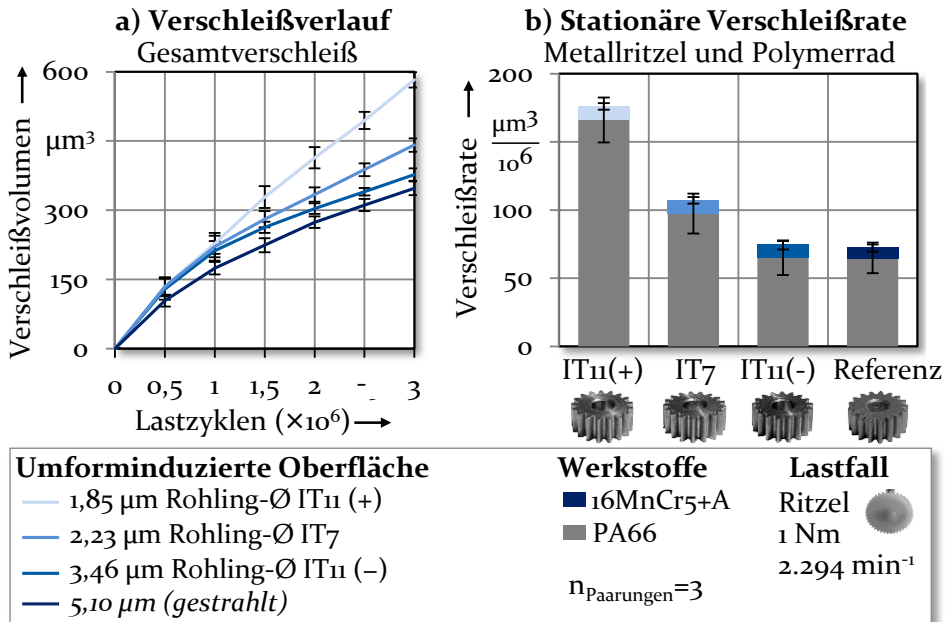


Bild 82: Verschleißverlauf (a) und stationärer Verschleiß (b) bei Variation der umforminduzierten Oberfläche (Paarung 16MnCr5+A - PA66)

Es resultieren variierende Verschleißverläufe in Abhängigkeit der umforminduzierten Oberflächentopografie (Bild 82 a). Bei Einsatz der Ritzel mit geringster Rautiefe (IT<sub>11</sub>-, R<sub>z</sub> 1,85 µm) folgt ein nahezu linearer Verlauf, was den im Modellversuch (Bild 23) identifizierten erhöhten Verschleiß bei niedriger Rauheit bestätigt. Bei den übrigen Paarungen treten eine charakteristische Einlauf- und stationäre Verschleißphase auf, wobei der lineare Verlauf bei Einsatz der mit Rohlingdurchmesser IT<sub>11</sub>(+) fließgepressten sowie der abrasivgestrahlten Ritzel nahezu identisch ist.

Die Auswertung der stationären Verschleißraten (Bild 82 b) zeigt, dass die Oberfläche sich nicht auf den Verschleiß des Metallritzels auswirkt. Die geringen Verschleißraten des Polymerrads von  $64,8 \pm 3,5 \mu\text{m}^3/10^6$  und  $64,2 \pm 3,2 \mu\text{m}^3/10^6$  bestätigen das Verschleißminium bei Einsatz der fließgepressten Oberfläche mit Rautiefe R<sub>z</sub> 3 = ,46 µm sowie der abrasivgestrahlten Oberfläche (R<sub>z</sub> = 5,10 µm). Dies deutet auf die Ausbildung eines verschleißmindernden Transferfilms hin. Demgegenüber ist der Verschleiß bei den Oberflächen mit geringerer Rauheit mit  $97,40 \pm 4,7 \mu\text{m}^3/10^6$  (IT 7) und  $166,0 \pm 6,5 \mu\text{m}^3/10^6$  (IT<sub>11</sub>+) deutlich erhöht, was auf die Zunahme adhäsiven Verschleißes zurückgeführt wird.

### Verschleißbedingte Oberflächentopografie

Zur Bestätigung des Auftretens adhäsiven Verschleißes sowie der Ausbildung eines Transferfilms werden die verschleißbedingte Topografie und Rautiefe ausgewertet, sowie EDX-Analysen durchgeführt (Bild 83).

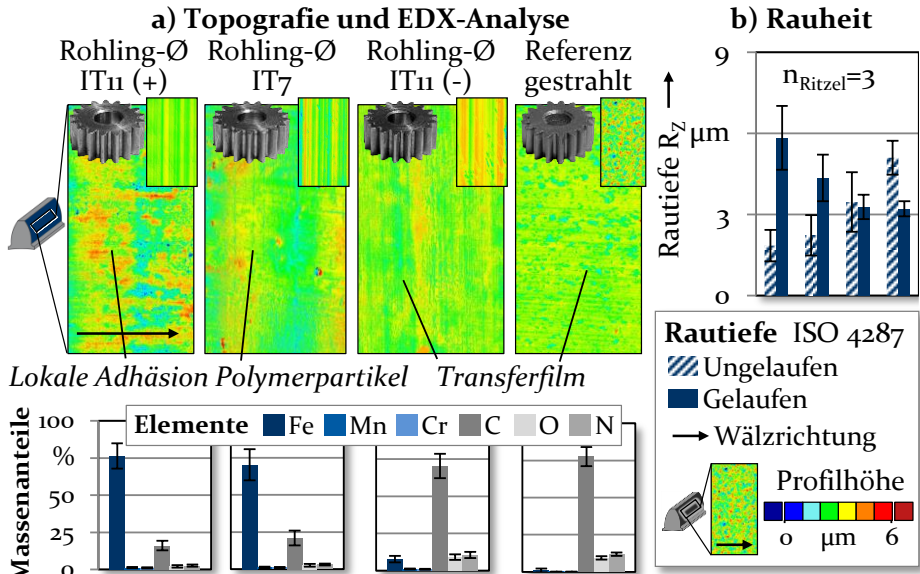


Bild 83: Veränderung der a) Topografie und b) Rautiefe infolge Verschleiß bei Variation der Ausgangsoberfläche (Paarung PA66)

Anhand der Topografie sowie der mittels EDX-Analyse bestimmten Massenanteile (Bild 83 a) werden lokale Anhaftungen von Polymerpartikeln bei den Ritzeln mit geringer initialer Rautiefe (Rohlingdurchmesser IT<sub>11</sub>(+) und IT<sub>7</sub>) festgestellt. Dies bestätigt das Auftreten adhäsiven Verschleißes. Zudem wird keine Ausbildung eines vollständigen Transferfilms festgestellt, was anhand der unregelmäßigen Topografie sowie lediglich geringen Massenanteile des Polymerwerkstoffs auf der verschlissenen Oberfläche erkennbar ist. Dies ist auf den Einfluss der reduzierten Rautiefe der metallischen Oberfläche auf den Verschleiß und die Transferfilmbildung zurückzuführen. Durch die bei geringer Rauheit erhöhte wahre Kontaktfläche der Partner [197] wird adhäsiver Verschleiß des Polymerrads verstärkt. Gleichzeitig ermöglicht die glatte metallische Oberfläche ohne Rauheitstäler keine Anhaftung der Polymerpartikel zur Ausbildung eines stabilen Transferfilms [186].

Die Auswertung der Rautiefe  $R_z$  (Bild 83 b) zeigt eine deutliche Aufrauung der Oberflächen mit initial geringer Rauheit aufgrund der lokalen Adhäsion von Polymerpartikeln. Dagegen resultiert bei einer erhöhten initialen Rautiefe von  $R_z = 3,46 \mu\text{m}$  und  $R_z = 5,10 \mu\text{m}$  eine Einglättung der Oberfläche. Diese wird auf die Bildung eines Transferfilms zurückgeführt und durch die EDX-Analyse bestätigt. Die umforminduzierte Topografie beeinflusst das Verschleißverhalten somit maßgeblich.

### 8.2.3 Zahnradradien

Der Einfluss veränderter Zahnradradien auf die lokale Beanspruchung und den Verschleiß wurde in Abschnitt 6.2 für die Paarung mit PA66 ermittelt. Im Folgenden wird der Zusammenhang in der Paarung mit dem glasfaserverstärkten Polyamid PA66 GF30 und erhöhter Beanspruchung bei Einsatz von Stahlritzeln überprüft, da bei Messing und Aluminium hoher Verschleiß mit Zerstörung der Flankenform resultierten (Bild 77). Um die Übertragbarkeit des Zusammenhangs auf fließgepresste Zahnradpaarungen sicherzustellen, werden - mittels angepasster Matrizen - Zahnradpaarungen mit den minimal und maximal möglichen Radien (Bild 38) fließgepresst.

#### Auswirkung auf das Verschleißverhalten

Bild 84 zeigt den Verlauf des Gesamtverschleißes (a) und die stationären Verschleißraten (b) von Metallritzel und Polymerrad für die unterschiedlichen Zahnradradien sowie die Referenzgeometrie. Analog zur Referenzgeometrie resultiert bei Einsatz der variierten Radien ein lineares Verschleißverhalten (Abschnitt 8.2.1).

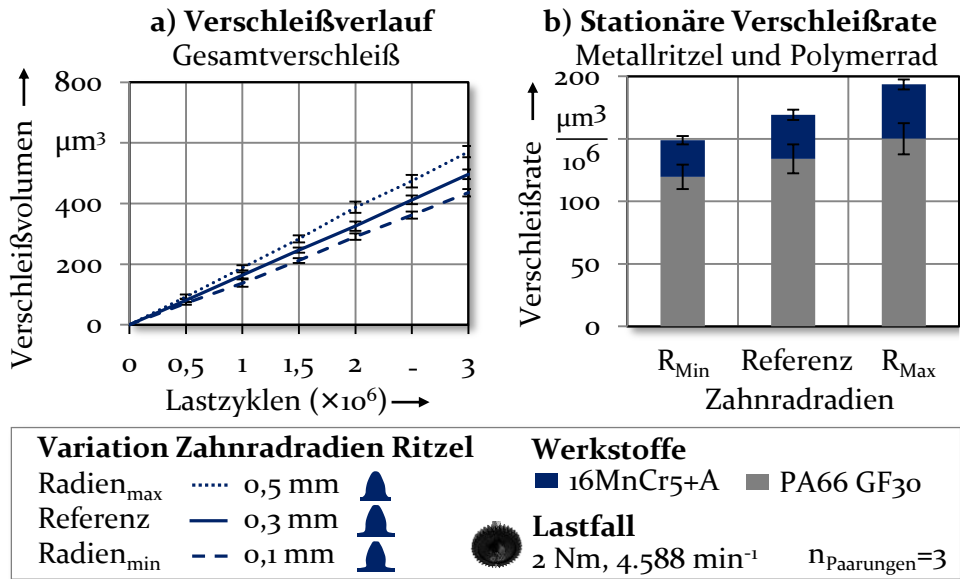


Bild 84: Verschleißverlauf (a) und stationärer Verschleiß (b) bei Variation der Zahnradradien der fließgepressten Ritzel (Paarung 16MnCr5+A - PA66 GF30)

Bei minimalen Zahnradradien werden sowohl die Verschleißraten des Metallritzels als auch des Polymerrads gegenüber der Referenz um 16,7 % auf  $29,3 \pm 3,4 \mu\text{m}^3/10^6$  (Rad) sowie um 10,8 % auf  $119,6 \pm 9,8 \mu\text{m}^3/10^6$  (Rad) reduziert. Demgegenüber steigt die Verschleißrate bei maximalen Kopf- und Fußradien um 23,7 % (Ritzel) und um 12,0 % (Rad) an. Die Ergebnisse bestätigen somit den in Abschnitt 6.2 identifizierten Zusammenhang auch bei Einsatz höherfesterer Polymerwerkstoffe sowie gesteigerter Drehzahl und Drehmoment. Zur Überprüfung des Einflusses der infolge der variierten Radien veränderten lokalen Beanspruchung auf den lokalen Verschleiß werden in Bild 85 Schliffbilder der verschlissenen Ritzel gezeigt.

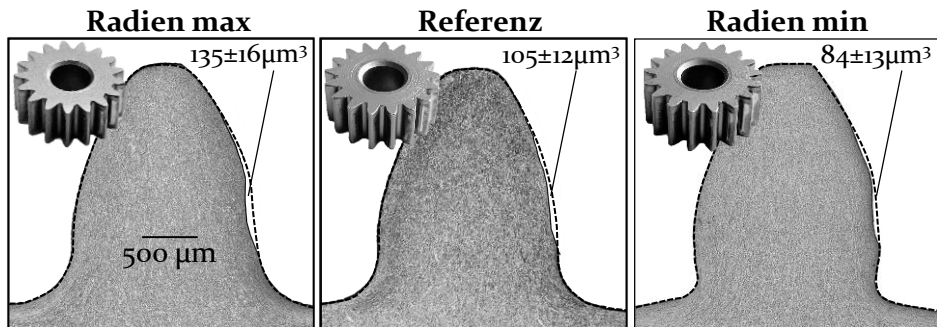


Bild 85: Verschlissene Zahnkontur bei Variation der Zahnradradien der fließgepressten Ritzel (Paarung 16MnCr5+A - PA66 GF30)

Die Auswertung der verschlissenen Zahnkontur bestätigt die Abhängigkeit des lokalen Verschleißes von der kombinierten Beanspruchung. Maximaler Verschleiß tritt im Bereich des Zahnfußes auf und wird bei vergrößerten Zahnradradien erhöht, was auf die erhöhte kombinierte Beanspruchung in diesem Bereich zurückzuführen ist (Bild 40) und den in Bild 41 identifizierten Einfluss der Zahnradradien auf den Verschleiß belegt.

### 8.3 Ableitung eines Verständnisses und Bereitstellung von Empfehlungen für das Fließpressen einsatzfertiger Verzahnungen

Im Folgenden werden die Untersuchungsergebnisse wissenschaftlich bewertet. Ziel ist die Ableitung eines Verständnisses der Einflussgrößen auf das Verschleißverhalten der Materialpaarung und die Bereitstellung von Maßnahmen zur gezielten Beeinflussung der einsatzrelevanten Bauteileigenschaften fließgepresster Zahnräder. Hierzu erfolgt die Synthese der numerisch und experimentell identifizierten Zusammenhänge sowie der zugrundeliegenden Wirkmechanismen, die in den Abschnitten 8.1 und 8.2 überprüft wurden. Abschließend werden die Erkenntnisse in einer Empfehlungsmatrix systematisch zusammengefasst.

#### 8.3.1 Einflussgrößen auf das Verschleißverhalten

Die betriebsangepasste Herstellung metallischer Zahnräder für den Einsatz in der Materialpaarung Metall-Kunststoff setzt die Kenntnis von Einflussgrößen auf das Verschleißverhalten voraus. Die im Rahmen der Arbeit identifizierten Verschleißmechanismen sind in Bild 86 dargestellt.

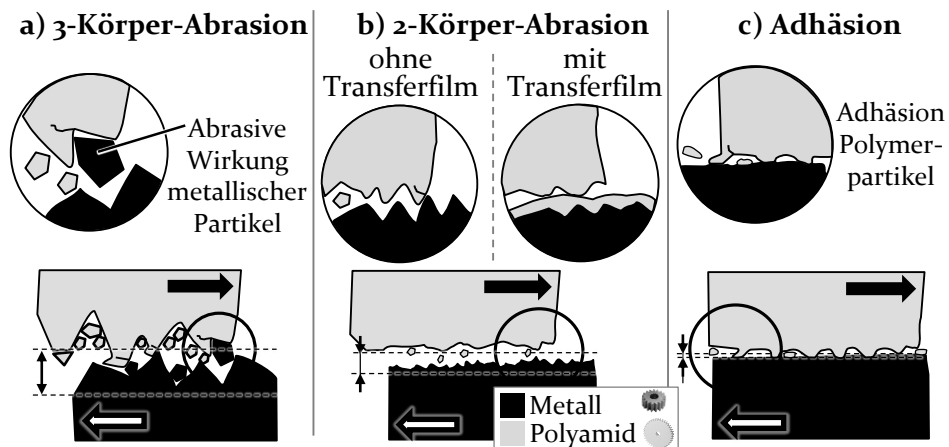


Bild 86: Identifizierte Verschleißmechanismen

### Einfluss von Werkstoff und Flankenhärte des metallischen Ritzels

Der Einfluss von Werkstoff und der durch konventionelle Herstellung sowie Fließpressen resultierenden Flankenhärte des metallischen Ritzels auf den Verschleiß der Paarung mit PA66 (a) sowie PA66GF30 (b) wird in Bild 87 zusammengefasst. Das Auftreten der identifizierten Verschleißmechanismen (Bild 86) wurde bei Einsatz unterschiedlicher Metallwerkstoffe sowie in der Paarung mit einem faserverstärkten Polymerrad unter erhöhtem Lastfall nachgewiesen, wodurch die Übertragbarkeit der Erkenntnisse sichergestellt wird.

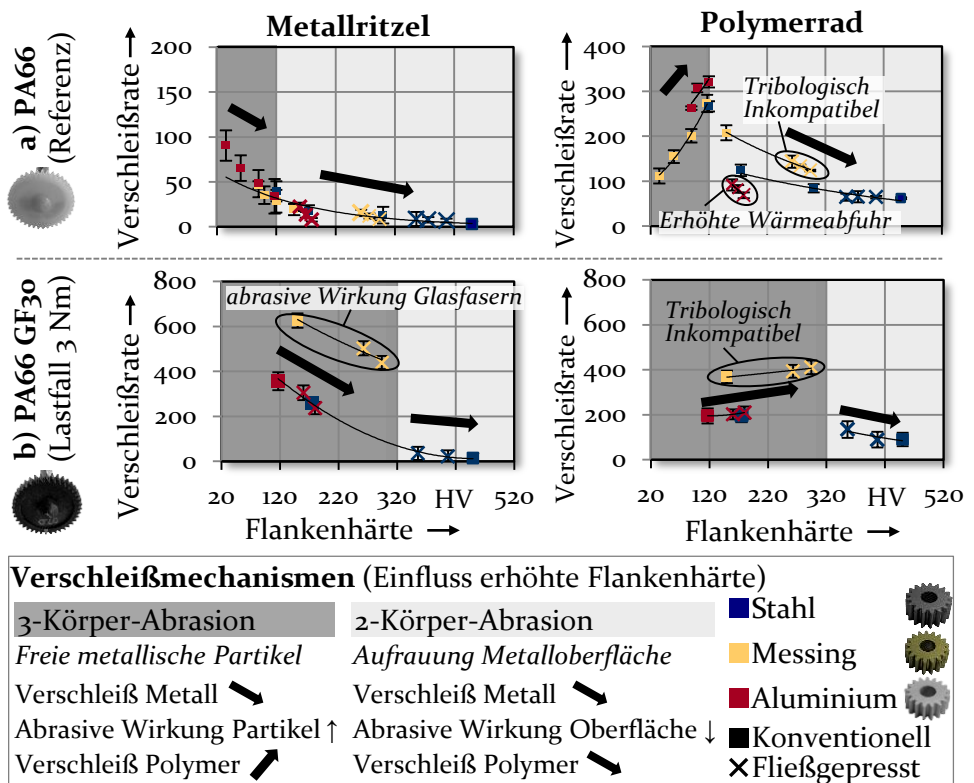


Bild 87: Einfluss von Metallwerkstoff und fertigungsbedingter Zahnflankenhärte auf den Verschleiß in der Paarung mit PA66 (a) und PA66 GF30 (b)

In der Paarung mit PA66 (Bild 87 a) tritt bei einer Flankenhärte unter 120 HV 3-Körper-Abrasion (Bild 86 a) durch freigesetzte metallische Partikel auf. Die metallischen Partikel weisen aufgrund des hohen Härtegradienten eine starke abrasive Wirkung auf das Polymerrad auf, die mit zunehmender Härte des Metallwerkstoffs erhöht wird, weshalb der Verschleiß des Polymerrads bis zu einer Härte des Metallritzels von 120 HV

deutlich zunimmt. Bei ausreichender Festigkeit des Metallritzels werden keine großen metallischen Partikel abgetragen, sondern es resultiert lediglich eine Aufrauung oder Einglättung der Oberfläche in Abhängigkeit der Härte, wodurch im tribologischen System 2-Körper-Abrasion (Bild 86 b) resultiert. Die Ergebnisse bei Adaption des Flankenwinkels bestätigen den Einfluss eines lokal erhöhten Umformgrades auf die Verschleißfestigkeit gegen Aufrauung und Abrasion der Oberfläche des Metallritzels. Aufgrund der abnehmenden abrasiven Wirkung der metallischen Oberfläche in Folge einer, aufgrund der erhöhten Härte, verringerten Aufrauung wird zudem der Verschleiß des Polymerrads reduziert. Bei Einsatz von Aluminium wird durch die gesteigerte Zahnflankenhärte die Ausbildung eines verschleißmindernden Transfer-films ermöglicht und aufgrund einer erhöhten Wärmeleitfähigkeit eine hohe Wärmeabfuhr und reduzierte Einsatztemperatur des Polymerrads erreicht, die sich positiv auf die mechanischen Eigenschaften und den Verschleiß auswirkt. Im Gegensatz dazu wird bei Einsatz von Messing trotz hoher Festigkeit aufgrund der geringen tribologischen Kompatibilität keine Transferfilmbildung (Bild 86 c) festgestellt (Bild 79), weshalb der Verschleiß des Polymerrads gegenüber der Paarung mit Stahl oder Aluminium deutlich erhöht ist.

In der Paarung mit PA66 GF30 (Bild 87 b) wird aufgrund der abrasiven Wirkung der Glasfasern sowie der gesteigerten Beanspruchung das Auftreten von 3-Körper-Abrasion (Bild 86 a) bis zu einer Härte von 320 HV festgestellt. Das Ausbrechen größerer metallischer Partikel tritt sowohl bei Einsatz der konventionell hergestellten Stahlritzels sowie aller untersuchten Messing- und Aluminiumritzels auf. Im Härtebereich, in dem 3-Körper-Abrasion folgt, führt eine erhöhte metallische Härte zu einer Zunahme des Polymerverschleißes, die auch bei PA66 festgestellt wurde. Diese fällt bei PA66 GF30 gegenüber dem unverstärkten Polyamid aber geringer aus, da der Härtegradient zwischen Metall- und Polymerwerkstoff und somit die abrasive Wirkung der metallischen Verschleißpartikel deutlich reduziert sind. Lediglich bei den fließgepressten sowie den einsetzgehärteten 16MnCr5+A-Ritzeln resultiert 2-Körper-Abrasion (Bild 86 b), da die metallische Verschleißrate auf unter  $25 \mu\text{m}^3/10^6$  reduziert wird und keine größeren metallischen Partikel freigesetzt werden. Analog zur Paarung mit dem unverstärkten PA66 tritt ein erhöhter Verschleiß des Polymerrads bei Einsatz von Messing in der Paarung mit PA66 GF30 auf, was auf die geringe tribologische Kompatibilität zurückgeführt wird. Auffällig ist, dass auch der Verschleiß des Messingritzels gegenüber den anderen Metallwerkstoffen stark erhöht ist. Dies wird durch die abrasive Wirkung der Glasfasern

erklärt, die bei Verschleiß des faserverstärkten Polymerrads freigesetzt werden.

### **Einfluss der Oberflächentopografie des metallischen Ritzels**

Die Untersuchungen zum Einfluss der umforminduzierten Oberflächentopografie in Abschnitt 8.2.2 bestätigen die Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus dem Modellversuch (Bild 23). Die aus dem Fließpressprozess resultierenden Oberflächen mit einer Vorzugsrichtung gegen die Wälzrichtung zeigen ein qualitativ vergleichbares Verschleißverhalten wie die gleichartige Topografie im Stift-Scheibe-Versuch (Bild 88).

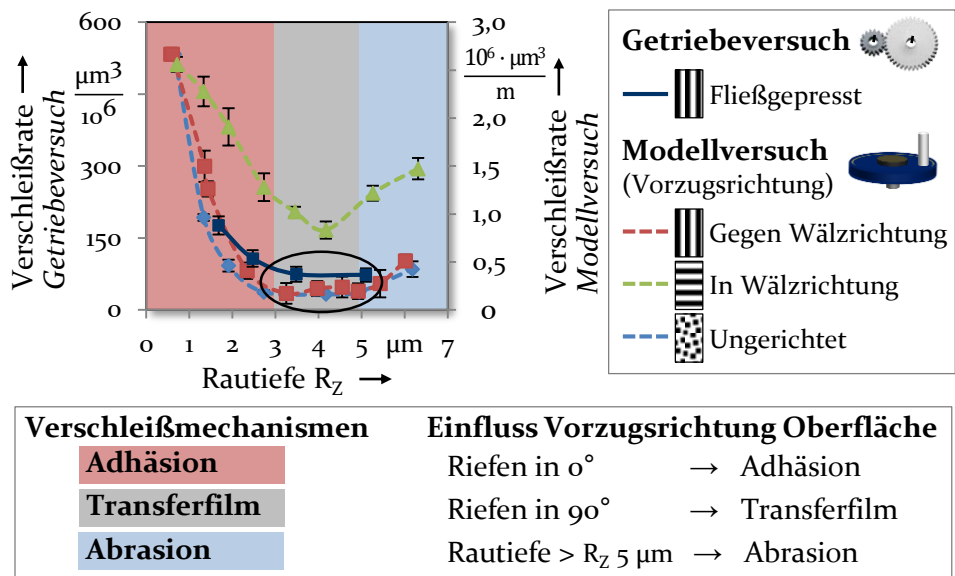


Bild 88: Einfluss der fertigungsbedingten Oberflächenrauheit auf die resultierenden Verschleißmechanismen in der Paarung Stahl-PA66 (Modellversuch nach [186])

Bei einer Rautiefe  $R_z < 3 \mu\text{m}$  wird hoher adhäsiver Verschleiß (Bild 86 c) festgestellt. Auch das im Modellversuch identifizierte Rauheitsoptimum zwischen  $R_z = 3$  und  $5 \mu\text{m}$  wird durch die Ergebnisse verifiziert. Die, in Abhängigkeit der Prozesseinflussgrößen bedingte, Oberflächentopografie beeinflusst das Verschleißverhalten maßgeblich. Die Modellversuche zeigen zudem, dass die Vorzugsrichtung der Oberfläche die Transferfilmbildung entscheidend beeinflusst, weshalb die Rautiefe als alleiniger Indikator für das Verschleißverhalten, wie von KÜNKEL [39] vorgeschlagen, nicht ausreichend ist.

### Einfluss der Zahnradradien des metallischen Ritzels

Auf Grundlage der Ergebnisse aus Abschnitt 8.2.3 werden funktionale Zusammenhänge abgeleitet. Diese sind in Bild 89 zusammengefasst.

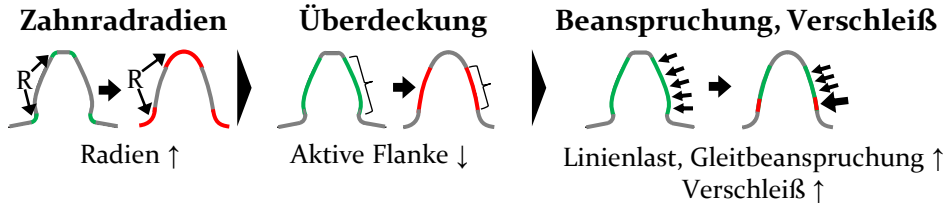


Bild 89: Funktionale Zusammenhänge zwischen Zahnradradien, Überdeckung, Beanspruchung und Verschleiß

Die Veränderung der Zahngeometrie durch Verkleinerung der Kopf- und Fußradien des Ritzels führt zu einer vergrößerten aktiven Flanke des Ritzels. Dadurch wird die Überdeckung innerhalb der Paarung erhöht, wodurch die Linienlast und Beanspruchung der Zahnflanke lokal verringert werden. Die lokal reduzierte Belastung führt zu einem lokal verminderten Verschleiß der Zahnflanken des Metallritzels im Fußbereich und des Polymerrads im Kopfbereich. Der Zusammenhang wurde sowohl für die Paarung mit PA66 als auch mit dem glasfaserverstärkten PA66 GF30 nachgewiesen. Hierdurch werden die Erkenntnisse von TAKAHASHI ET AL. [50] erweitert, die den Einfluss von Zähnezahl und Modul auf den Verschleiß untersuchten. Die gezielte Auslegung der Zahngeometrie ermöglicht eine erhöhte Lebensdauer der Paarung.

### Bewertung

Um der Herausforderung einer begrenzten Lebensdauer der Zahnradpaarung zu begegnen, ist eine Berücksichtigung der Einflussgrößen auf den Verschleiß bei der Auslegung und Herstellung der metallischen Verzahnung erforderlich. In Bild 90 werden die Erkenntnisse vergleichend zusammengefasst.

Aufgrund der unzureichenden tribologischen Kompatibilität in der Paarung mit den untersuchten Polyamidzahnradern infolge der gegenüber Stahl und Aluminium geringen Oberflächenenergie von Messing [195], wird keine Ausbildung eines verschleißmindernden Transferfilms ermöglicht und es resultiert erhöhter adhäsiver Verschleiß. Dagegen wird bei Einsatz von Stahl und Aluminium bei geeigneter Oberflächentopografie und Festigkeit ein Transferfilm gebildet, wodurch der Verschleiß deutlich reduziert wird. Um das Auftreten abrasiven Verschleißes des Ritzels zu vermei-

den, ist eine ausreichende Flankenhärte des Metallwerkstoffs - in Abhängigkeit vom eingesetzten Polyamidwerkstoff - erforderlich. Bei abnehmender Flankenhärte des Ritzels resultieren zunächst 2-Körper- und dann 3-Körper-Abrasion, wobei das Verschleißmaximum in der Paarung nicht bei minimaler sondern bei mittlere Härte des Ritzels in der Übergangsphase der beiden Verschleißarten auftritt.

		Zielgrößen						
		Transferfilm	Verschleiß		Temperatur	Oberfläche		
		Ritzel	Ritzel	Rad	Paarung	Ritzel		
<b>Wirkung</b> ↗ Anstieg ↘ Abnahme								
<b>Bewertung</b> Positiv    Negativ								
Einflussgrößen	Werkstoff	Stahl	↗	-	-	-	-	
		Messing	↘	-	↗	↗	↗	
		Aluminium	↗	-	↘	↘	-	
	Flankenhärte ↑		↗	↘	↗/↘	↗/↘	↘	
	Oberfläche	Richtung	Rautiefe ↑	↘/↗	-	↗/↘	↗/↘	↗/↘
			In WR	↘	-	↗	↗	↗
			Gegen WR	↗	-	-	-	-
			Ungerichtet	↗	-	-	-	-
Zahnradradien ↑		-	↗	↗	↗	-		

Bild 90: Bewertung des Einflusses der Bauteileigenschaften des metallischen Ritzels auf das Verschleißverhalten der Materialpaarung

Bei ausreichender Flankenhärte des Ritzels ist die Topografie der Oberfläche ausschlaggebend für das Auftreten adhäsiver und abrasiver Verschleißmechanismen. Minimaler Verschleiß in der Paarung mit Polyamid resultiert bei einer gemittelten Rautiefe  $R_z$  der metallischen Oberfläche im Bereich von 3 bis 5  $\mu\text{m}$ , da Adhäsion und Abrasion verringert werden und die Ausbildung eines Transferfilms ermöglicht wird. Eine Vorzugsrichtung der Oberfläche in Wälzrichtung führt zu erhöhter Adhäsion und beeinflusst die Transferfilmbildung negativ. Ungerichtete Topografien, wie sie bei konventioneller Herstellung resultieren, sowie Oberflächen mit Vorzugsrichtung gegen Wälzrichtung, die beim Vorwärtsfließpressen entstehen, zeigen ein vergleichbares Verschleißverhalten und ermöglichen eine stabile Transferfilmbildung.

Hinsichtlich der Auslegung der Zahngeometrie sind minimale Zahnradradien zu bevorzugen, da die Überdeckung in der Paarung vergrößert und

somit eine hohe Linienlast im Fußbereich, in dem die maximale Gleitbeanspruchung vorliegt, vermieden wird. Dies führt zu einer Reduktion der lokalen kombinierten Beanspruchung und einem verringerten Verschleiß.

### 8.3.2 Gezielte Beeinflussung der Bauteileigenschaften

Um die betriebsangepasste Herstellung fließgepresster Verzahnungen zu ermöglichen, ist die Kenntnis halbzeugseitiger Einflussgrößen sowie werkzeugseitiger Stellhebel zur gezielten Beeinflussung der einsatzrelevanten Bauteileigenschaften erforderlich. Vor diesem Hintergrund wurde der Einfluss der Fließeigenschaften des Zahnradwerkstoffs, der Halbzeug- und der Matrizengeometrie untersucht.

#### Einfluss der Fließeigenschaften

Die in Abschnitt 7.2.1 numerisch erarbeiteten Zusammenhänge wurden durch die experimentellen Ergebnisse in Abschnitt 8.1.2 verifiziert. Die abgeleiteten Wirkzusammenhänge zur Auswirkung der Fließeigenschaften des Zahnradwerkstoffs auf den Stofffluss sind in Bild 91 dargestellt.

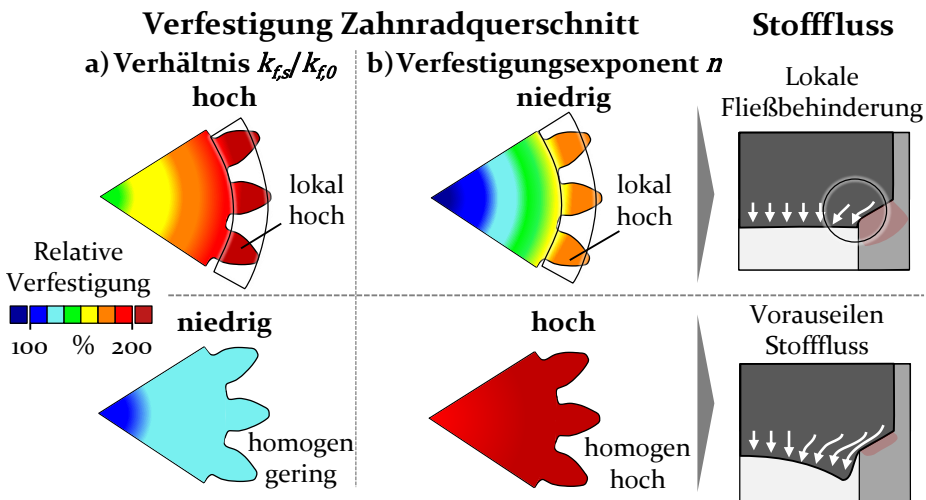


Bild 91: Wirkzusammenhänge: Auswirkung der Fließeigenschaften auf den Stofffluss

Ein hohes Verhältnis der Sättigungs- zur Anfangsfließspannung ( $k_{fs}/k_{fo}$ ) führt aufgrund der im Randbereich des Zahnradquerschnitts hohen Umformgrade zu einer starken relativen Verfestigung (Bild 91 a). Dagegen liegt bei einem geringen Verhältnis  $k_{fs}/k_{fo}$  trotz unterschiedlicher Umformgrade eine weitgehend homogene, geringe Verfestigung vor.

Auch durch den Verfestigungsexponenten ( $n$ ) (Bild 91 b) wurde ein Einfluss auf die Verfestigung des Zahnradquerschnitts ermittelt. Ein geringer

Exponent führt dazu, dass eine hohe Verfestigung nur bei hohen Umformgraden lokal im Randbereich erreicht wird. Hingegen resultiert bei einem hohen Exponenten auch bei geringen Umformgraden in der Zahnmitte bereits eine relativ hohe Verfestigung, weshalb eine weitgehend homogene Verfestigung des Querschnitts folgt.

Die lokal variierende Verfestigung bei hohem Verhältnis  $k_{f,s}/k_{f,o}$  sowie bei niedrigem Verfestigungsexponenten  $N$ , wie sie beim Stahlwerkstoff im weichgeglühten Zustand auftritt, bewirkt eine lokale Fließbehinderung im Randbereich der Verzahnung. Hierdurch wird ein Vorseilen des Stoffflusses in diesem Bereich bedingt durch die dort starke Querschnittsverringerung und hohen Umformgrade vermieden. Dagegen liegt sowohl bei geringem Verhältnis  $k_{f,s}/k_{f,o}$  als auch bei hohem Verfestigungsexponenten eine weitgehend homogene Verfestigung vor. Der über den Zahnradquerschnitt gleichmäßige Fließwiderstand bedingt ein Vorseilen des Stoffflusses im Randbereich, da dort hohe Umformgrade vorliegen. Dies führt zur Bildung eines Materialeinzugs in der Zahnradmitte und erklärt die in bisherigen Arbeiten identifizierte geringe erzielbare Formfüllung bei Umformung von Aluminium [91].

### Einfluss des Rohlingdurchmessers

Die experimentellen Untersuchungen aus Abschnitt 8.1.1 bestätigen die in Abschnitt 7.2.2 numerisch identifizierten Wirkzusammenhänge. Geringfügige Abweichungen des Rohlingdurchmessers wirken sich auf die Formfüllung, Verzahnungsgenauigkeit und die Oberflächenrauheit der fließgepressten Zahnflanken aus (Bild 92).

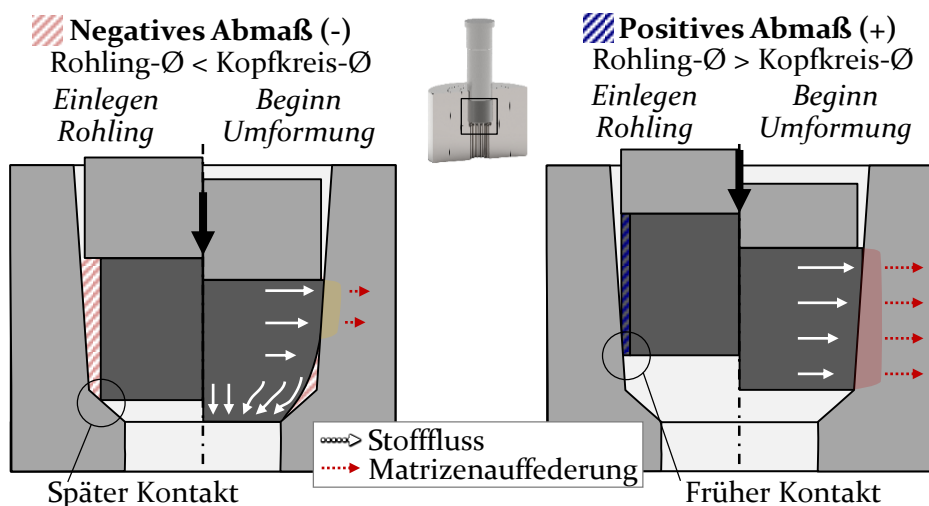


Bild 92: Wirkzusammenhänge: Auswirkung des Rohlingdurchmessers auf den Stofffluss

Im Fall eines negativen Abmaßes resultiert ein Materialdefizit, weshalb der Rohling erst in der Umformzone in Kontakt mit der Matrize kommt. Es tritt zu Prozessbeginn eine radiale Aufweitung des Rohlings im oberen Bereich auf. Im unteren Bereich fließt der Werkstoff dagegen ungehindert in die Matrizenkavität, weshalb ein radialer Einzug entsteht. Dieser wirkt sich negativ auf die Formfüllung (Bild 67) und Ausformung der Flankenlinie (Bild 68) aus. Ein hohes Materialdefizit führt außerdem zu einer Unterfüllung der Verzahnung, weshalb die Profilabweichungen vergrößert werden (Bild 68).

Bei einem Materialübermaß kommt der Rohling bereits im Matrizeinlauf mit der Werkzeugwand in Kontakt und es resultiert eine erhöhte Reibung aufgrund der vergrößerten Kontaktfläche, die infolge der radialen Aufweitung des Rohlings weiter zunimmt. Dies führt zu hohen Prozesskräften sowie einer vergrößerten elastischen Auffederung der Fließpressmatrize, wodurch die umforminduzierte Rautiefe der Zahnflanke reduziert (Bild 69) und die Profil-Gesamtabweichung vergrößert werden (Bild 68). Dagegen werden durch den zu Prozessbeginn erhöhten Werkzeugkontakt die Ausformung im unteren Werkstückbereich verbessert und die Einzugshöhe (Bild 67) sowie die Flankenlinienabweichungen verringert (Bild 68).

### Adaption der Matrizengeometrie

Die Adaption der Matrizengeometrie durch Integration eines Flankenwinkels (Bild 93) stellt eine geeignete Maßnahme zur Steigerung der lokalen Verfestigung und Verbesserung der Formfüllung dar. Durch die Umlenkung des Stoffflusses in den Flankenbereich werden lokal höhere Umformgrade und somit ein erhöhter Fließwiderstand sowie eine verringerte Materialflussgeschwindigkeit erreicht. Hierdurch wird das Vorseilen des Stoffflusses im Randbereich reduziert und die Bildung eines Einzugs in der Bauteilmitte bei der Umformung von Aluminium im vorverfestigten Materialzustand vermieden.

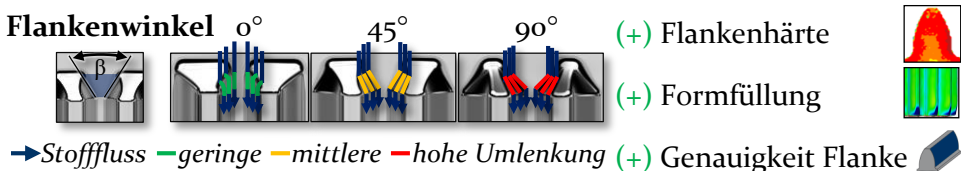


Bild 93: Einfluss des Flankenwinkels auf die Stoffflussumlenkung und Bauteileigenschaften

Die gezielte Stoffflussumlenkung wirkt sich allerdings nicht auf die erforderlichen Prozesskräfte, die resultierende Matrizenauffederung und den

Kontaktdruck in der Matrize aus. Es sind somit Zahnräder mit gleichbleibender Oberflächenqualität und Profilgenauigkeit herstellbar.

### Bewertung

Die aus der Legierungszusammensetzung und dem Werkstoffzustand resultierenden Fließeigenschaften des Zahnradwerkstoffs beeinflussen die erzielbaren Bauteileigenschaften. Zudem wirkt sich die Toleranzlage des Rohlingdurchmessers auf die geometrische Genauigkeit und die Oberflächentopografie aus. Die Anpassung der Matrizegeometrie ermöglicht eine gezielte Beeinflussung der einsatzrelevanten Zahnradeigenschaften. Bild 94 stellt eine zusammenfassende Bewertung der Einflussgrößen und Maßnahmen dar.

		<b>Wirkung</b> ↗ Anstieg ↘ Abnahme  <b>Bewertung</b> Positiv    Negativ	Zielgrößen					Kraft
			Bauteil				Prozess	
			Formfüllung	Genauigkeit Profil	Genauigkeit Flanke	Härte Flanke		
<b>Einflussgrößen</b>	Halbzeug	Fließeigenschaften						
		Anfangsfließspannung $k_{f0}$ ↑	↗	↘	↗	↗	-	↗
		Verhältnis $k_{fs}/k_{f0}$ ↑ (Verfestigungspotential)	↗↗	↘	↗	↗↗	-	↗
	Rohling-Ø	Verfestigungsexponent $n$ ↑	↘↘	↘	↘↘	↗	-	↗
		Materialdefizit ↑	↘	↗/↘	↘	-	↗	↘
		Materialübermaß ↑	↗	↘	↗	-	↘	↗
Werkzeug	Schulterwinkel ↑	↗↗	↘	↗↗	↗	↘	↗↗	
	Flankenwinkel ↑	↗	-	↗↗	↗↗	-	-	

Bild 94: Bewertung des Einflusses des Halbzeugs und werkzeugseitiger Maßnahmen auf die Bauteil- und Prozesseigenschaften fließgepresster Zahnräder

Durch eine erhöhte Anfangsfließspannung werden die Formfüllung sowie die Genauigkeit der Flankenlinie positiv beeinflusst, gleichzeitig nehmen die Prozesskraft zu und die Profilgenauigkeit, aufgrund der erhöhten Matrizenauflage, ab. Das Verhältnis der Sättigungs- zur Anfangsfließspannung (Verfestigungspotential) sowie der Verfestigungsexponent wirken sich auf den Verfestigungsgradienten über den Zahnradquerschnitt und

das Vorseilen des Stoffflusses im Randbereich aus (Bild 91), wodurch die Formfüllung beeinflusst wird. Eine wesentliche Herausforderung wurde bei der Umformung von Aluminium im vorverfestigten Materialzustand aufgrund des geringen Verfestigungspotentials identifiziert. Es resultieren neben einer lediglich geringen Härtezunahme die Bildung eines Materialeinzugs in der Zahnradmitte sowie eine begrenzte Genauigkeit der Flankenlinie.

Die Berücksichtigung der Toleranzlage des Rohlingdurchmessers ist erforderlich, um ein reproduzierbares Prozessergebnis und eine hohe Genauigkeit der hergestellten Zahnräder zu erzielen. Bei reduzierten Anforderungen an die Verzahnungsgenauigkeit kann dagegen eine erweiterte Toleranzvorgabe des Halbzeugs erfolgen, wobei das Auftreten kritischer Werkzeugbeanspruchungen sowie negative Auswirkungen auf die Formfüllung zu berücksichtigen sind (Bild 92).

Die Adaption der Matrizengeometrie ermöglicht eine Verbesserung der einsatzrelevanten Bauteileigenschaften. Durch die Anpassung des Schulterwinkels wird allerdings die globale Verfestigung des Zahnprofils erhöht, wodurch die erforderliche maximale Prozesskraft und Werkzeugbeanspruchung zunehmen sowie die Profilgenauigkeit verringert wird. Dagegen führt die Einbringung eines Flankenwinkels zu einer gezielten Erhöhung der lokalen Verfestigung der Zahnflanke sowie einer deutlichen Verbesserung der Formfüllung (Bild 93).

Durch die gezielte Adaption des Fließpressprozesses werden verbesserte Bauteileigenschaften hinsichtlich der Zahnflankenhärte, der Verzahnungsgenauigkeit und der Zahnflankentopografie erzielt. Hierdurch wird das Einsatzpotential aller drei Metallwerkstoffe in der Materialpaarung deutlich gesteigert und die einsatzfertige Herstellung realisiert.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Fokus dieser Arbeit stand die Ermittlung funktionaler Zusammenhänge zwischen den Bauteileigenschaften durch Vorwärtsfließpressen hergestellter Zahnräder und dem Verschleißverhalten in der Materialpaarung Metall-Kunststoff. Zu diesem Zweck wurden die auftretenden Verschleißmechanismen identifiziert und die Auswirkungen der umforminduzierten Eigenschaften der Metallritzel auf den Verschleiß ermittelt. Zudem wurden wesentliche Einflussgrößen innerhalb des Fließpressprozesses analysiert und Methoden zur gezielten Beeinflussung der Bauteileigenschaften erarbeitet. Abschließend wurden ein grundlegendes Verständnis und praxisrelevante Empfehlungen zum Fließpressen einsatzfertiger Verzahnungen für die Materialpaarung abgeleitet.

Neben der experimentellen Untersuchung des Verschleißverhaltens auf einem Stift-Scheibe- sowie Getriebeprüfstand wurden Umformversuche durchgeführt. Weiterhin wurde ein numerisches Prozessmodell eingesetzt und validiert. Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse wurde durch Untersuchungen verschiedener Stahl-, Messing- und Aluminiumlegierungen in der Paarung mit dem Polyamid PA66 sowie dem glasfaserverstärkten PA66 GF30 unter verschiedenen Lastniveaus sichergestellt.

Bei unzureichender Flankenhärte des metallischen Ritzels resultieren 2-Körper- und 3-Körper-Abrasion, wobei das Verschleißmaximum beim Übergang der beiden Verschleißmechanismen aufgrund der abrasiven Wirkung der metallischen Verschleißpartikel auftritt. Bei ausreichender Flankenhärte des Metallritzels treten, in Abhängigkeit der Vorzugsrichtung und Rautiefe der Oberfläche, adhäsiver und abrasiver Verschleiß auf. Eine Vorzugsrichtung der Oberfläche des Ritzels in Wälzrichtung bedingt erhöhten adhäsiven Verschleiß und beeinflusst die Transferfilmbildung negativ. Dagegen ermöglichen sowohl eine ungerichtete als auch die beim Vorwärtsfließpressen umforminduzierte Topografie eine stabile Transferfilmbildung. Die im Rahmen der Untersuchungen ermittelte kombinierte Beanspruchung stellt eine gute qualitative Vorhersage des lokalen Verschleißes entlang der Zahnflanke dar. Kleine Zahnradradien vergrößern die Überdeckung in der Paarung und bewirken eine Reduktion der lokalen kombinierten Beanspruchung sowie des Verschleißes im Zahnfußbereich des Ritzels.

Beim Fließpressen von Aluminiumzahnradern resultiert eine unzureichende Formfüllung und Genauigkeit aufgrund der Bildung eines Materialeinzugs. Zudem wird trotz Umformung im ausscheidungsgehärteten Zustand eine unzureichende Festigkeit erzielt, infolgedessen hoher Verschleiß auftritt. Die im Umformprozess erzielbaren Bauteileigenschaften werden durch die Fließeigenschaften des Zahnradwerkstoffs sowie die Toleranzlage des Rohlingdurchmessers beeinflusst. Durch ein erhöhtes Fließspannungsniveau werden Formfüllung und Genauigkeit der Flankenlinie verbessert, gleichzeitig nehmen die Prozesskraft zu und die Profilgenauigkeit ab. Ein reduziertes Verhältnis der Sättigungs- zur Anfangsfließspannung sowie ein erhöhter Verfestigungsexponent, wie sie bei der Umformung von Werkstoffen im vorverfestigten Zustand vorliegen, wirken sich auf den Verfestigungsgradienten über den Zahnradquerschnitt aus, weshalb ein Materialeinzug in der Bauteilmitte resultiert. Ein Materialdefizit des Rohlingdurchmessers bewirkt infolge einer ungleichmäßigen radialen Aufweitung des Rohlings eine reduzierte Formfüllung und Flankenlinien-genauigkeit. Bei einem Materialübermaß resultiert ein erhöhter Kontaktdruck in der Matrize, wodurch die Oberflächentopografie und die Genauigkeit des Profils beeinflusst werden. Die Berücksichtigung der Toleranzlage des Rohlingdurchmessers ist erforderlich, um ein reproduzierbares Prozessergebnis und eine hohe Genauigkeit der hergestellten Zahnrad-er zu erzielen. Die Adaption der Matrizengeometrie ermöglicht eine gezielte Erhöhung der lokalen Verfestigung der Zahnflanke sowie eine deutliche Verbesserung der Formfüllung, wodurch das Einsatzpotential, insbesondere von Aluminiumzahnradern deutlich gesteigert und die Lebensdauer der Getriebepaarung erhöht werden.

Im Rahmen zukünftiger Forschungsaktivitäten sind die Erkenntnisse durch die Untersuchung veränderter Zähnezahlen, Zahnradmoduln und anderer Verzahnungsarten zu vertiefen. Zu überprüfen ist, ob der Zusammenhang zwischen der ermittelten kombinierten lokalen Beanspruchung und dem Verschleiß auch bei veränderten geometrischen Verhältnissen für eine betriebsoptimierte Auslegung genutzt werden kann. Zudem ist die erreichbare Werkzeugstandmenge bei der vorgestellten Adaption der Fließpressmatrize um einen Flankenwinkel zu untersuchen, da gegenüber aus dem Stand der Technik bekannten Maßnahmen eine Erhöhung der Prozesskraft und Werkzeugbeanspruchung vermieden wird. Anzustreben sind die industrielle Umsetzung der erforschten Erkenntnisse und der Einsatz fließgepresster Zahnrad-er in einem breiten Anwendungsspektrum in der Materialpaarung Metall-Kunststoff, um die ökonomischen und ökologischen Potentiale des Fertigungsverfahrens nutzbar zu machen.

## 10 Summary and Outlook

The focus of this work was to determine functional relationships between the component properties of gears produced by forward extrusion and the wear behavior in the metal-polymer material pairing. Against this background, the occurring wear mechanisms were identified and the effects of the forming-induced properties of the metal pinions on wear were determined. In addition, influencing variables within the extrusion process were analyzed and methods for a targeted adaption of the component properties were developed. Finally, a basic understanding and practical recommendations for the cold forging of ready-to-use gears for the material pairing were derived.

In addition to the experimental investigation of the wear behavior on a pin-on-disc and gear test rig, forming tests were carried out. Furthermore, a numerical process model was used and validated. The transferability of the findings was ensured by investigating various steel, brass and aluminum alloys in pairing with the polyamide PA66 as well as the glass fiber reinforced PA66 GF30 under different load levels.

Insufficient flank hardness of the metallic pinion results in 2-body and 3-body-abrasion, while maximum wear occurs at the transition between the two wear mechanisms due to the abrasive effect of the metallic wear particles. If the flank hardness of the metal pinion is sufficient, adhesive or 2-body-abrasive wear result, depending on the preferred direction and surface roughness. A preferred direction of the surface of the pinion in the rolling direction causes increased adhesive wear and negatively influences transfer film formation. In contrast, both a non-directional topography and the topography induced by deformation during forward extrusion enable stable transfer film formation. The combined load determined during the investigations represents a good qualitative prediction of local wear along the tooth flank. Small gear radii increase the overlap within the pairing and cause a reduction of the local combined load as well as the wear in the tooth root area of the pinion.

Extrusion of aluminum gears results in an insufficient die filling and accuracy due to the formation of a material indent. In addition, despite forming in the precipitation-hardened state, insufficient strength is achieved, leading to high wear and no formation of a transfer film. The flow properties of the gear material and the tolerance level of the workpiece diameter influ-

ence the achievable component properties in the forming process. Increased flow stress levels improve die filling and flank line accuracy, while at the same time process force increases and profile accuracy decreases. A reduced ratio of saturation flow stress to initial flow stress as well as an increased strain hardening exponent, as they are present in the forming of materials in the pre-consolidated state, affect the strain hardening gradient along the gear cross section, which is why a material indent in the center of the component results. A material deficit of the workpiece diameter causes reduced die filling and flank line accuracy as a result of non-uniform radial expansion of the workpiece during forming. A material excess results in increased contact pressure in the die, which affects the surface topography and accuracy of the profile. Consideration of the tolerance level of the workpiece diameter is necessary to achieve a reproducible process result and high accuracy of the manufactured gears. The adaptation of the die geometry enables a targeted increase of the local hardening of the tooth flank as well as a considerable improvement of the die filling, which significantly increases the application potential, especially of aluminum gears, and increases the service life of the gear pair.

Within the scope of future research activities, the findings should be extended by investigating modified numbers of teeth, gear moduli and other types of gear profiles. It is to be verified whether the correlation between the determined combined local load and local wear does also apply to changed geometric conditions and can be used for an operationally optimized design. In addition, the achievable die life with the presented adaptation of the die geometry by a flank angle is to be investigated, since an increase of the process force and die stress is avoided compared to measures known from the state of the art. The industrial implementation of the research findings and the use of forward extruded gears in a wide range of applications in the metal-polymer material combination are to be aimed for in order to utilize the economic and ecological potential of the manufacturing process.

## 11 Literaturverzeichnis

- [1] Statistisches Bundesamt: Umsatz der deutschen Branche für Antriebstechnik: Herstellung von Lagern, Getrieben, Zahnrädern und Antriebselementen (WZo8-28.15). Zitiert nach de.statista.com, 2022
- [2] Global Industry Analysts Inc.: Gears, Drives and Speed Changers - Global Market Trajectory & Analytics. 2022: Dublin
- [3] Sonnenberg, V.: Die Medizinbranche fordert Automatisierer heraus, in Maschinenmarkt. 2018, Vogel Communications Group: Würzburg
- [4] Ribbens, W.: Understanding Automotive Electronics: An Engineering Perspective, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017
- [5] Ciupek, M.: Cobot-Boom sorgt für Neuentwicklungen in der Antriebstechnik, in VDI Nachrichten. 2022, VDI Verlag: Düsseldorf
- [6] Steinicke, N.: Automatisierung dezentral und modular, in Der Konstrukteur. 2022, Vereinigte Fachverlage: Mainz
- [7] Singh, A.K.; Siddhartha; Singh, P.K.: Polymer spur gears behaviors under different loading conditions: A review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2(2017)232, 210-228
- [8] Briscoe, B.: Wear of polymers: an essay on fundamental aspects. Tribology International, 4(1981)14, 231-243
- [9] Klocke, F.; Gorgels, C.; Kauffmann, P.; Herzhoff, S.; Schalster, R.; Stuckenberg, A.; Vasiliou, V.: Zerspanung in Grenzbereichen - Trends in der Zahnräderfertigung. in 5. Chemnitzer Produktionstechnisches Kolloquium. 2008. Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten
- [10] Merklein, M.; Kiener, C.; Reiss, A.: Numerical Investigations on the Influence of Process Parameters on the Forming of Gears in Forward Extrusion. Applied Mechanics and Materials, (2015)805, 154-161
- [11] Groche, P.; Kramer, P.; Zang, S.; Rezanov, V.: Prediction of the Evolution of the Surface Roughness in Dependence of the

- Lubrication System for Cold Forming Processes. *Tribology Letters*, 1(2015)59, 9
- [12] Bausch, T.: Innovative Zahnradfertigung: Verfahren, Maschinen und Werkzeuge zur kostengünstigen Herstellung von Stirnrädern mit hoher Qualität, Renningen: expert Verlag, 2015, 778
- [13] Jeong, M.S.; Lee, S.K.; Yun, J.H.; Sung, J.H.; Kim, D.H.; Lee, S.;Choi, T.H.: Green manufacturing process for helical pinion gear using cold extrusion process. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 6(2013)14, 1007-1011
- [14] Weiß, A.; Deliktas, T.; Liewald, M.; Missal, N.: Cold forging of gear components by a modified Samanta process. *Forschung im Ingenieurwesen*, 3(2020)84, 215-221
- [15] Klocke, F.; Brecher, C.: *Zahnrad- und Getriebetechnik: Auslegung - Herstellung - Untersuchung - Simulation*, München: Carl Hanser-Verlag, 2017, 668
- [16] Radzevich, S.P.: *Dudley's Handbook of Practical Gear Design and Manufacture*, Milton: CRC Press, 2016, 846
- [17] Davis, J.R.: *Gear Materials, Properties, and Manufacture*, Ohio: ASM International, 2005, 339
- [18] Niemann, G.; Winter, H.: *Maschinenelemente: Band 2: Getriebe allgemein, Zahnradgetriebe-Grundlagen, Stirnradgetriebe*, Berlin: Springer, 2013
- [19] Norm ISO 1328-1: *Zylinderräder - ISO-Toleranzsystem - Teil 1: Definitionen und zulässige Werte für Abweichungen an Zahnflanken*. Berlin: Beuth, 2013
- [20] Weck, M.: *Moderne Leistungsgetriebe*, Berlin: Springer, 1992, 224
- [21] VDI 2736 - Blatt 1: *Thermoplastische Zahnräder - Werkstoffe, Werkstoffauswahl, Herstellverfahren, Herstellgenauigkeit, Gestalten*. Berlin: Beuth, 2016
- [22] Decker, K.H.; Rieg, F.; Engelken, G.; Weidemann, F.; Hackenschmidt, R.; Alber-Laukant, B.: *Decker Maschinenelemente: Funktion, Gestaltung und Berechnung*: Carl Hanser-Verlag, 2018
- [23] Norm ISO 21771: *Zahnräder - Zylinderräder und Zylinderradpaare mit Evolventenverzahnung - Begriffe und Geometrie*. Berlin: Beuth, 2014

- [24] Senthilvelan, S.; Gnanamoorthy, R.: Wear characteristics of injection-moulded unfilled and glass-filled nylon 6 spur gears. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 6(2004)218, 495-502
- [25] Feulner, R.W.: Verschleiß trocken laufender Kunststoffgetriebe - Kennwertermittlung und Auslegung. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), 2008
- [26] GfT Arbeitsblatt 7: Tribologie Definitionen: Gesellschaft für Tribologie e.V. (GfT), 2019
- [27] Norm ISO 4378-2: Gleitlager - Begriffe, Definitionen, Einteilung und Symbole - Teil 2: Reibung und Verschleiß. Berlin: Beuth, 2013
- [28] Burwell, J.T.: Survey of possible wear mechanisms. Wear, 2(1957)1, 119-141
- [29] Bowden, F.P.; Tabor, D.: The Friction and Lubrication of Solids, Oxford: Clarendon Press, 1950
- [30] Rabinowicz, E.: The least wear. Wear, 1-3(1984)100, 533-541
- [31] Archard, J.F.: Contact and Rubbing of Flat Surfaces. Journal of Applied Physics, 8(1953)24, 981-988
- [32] Buckley, D.H.: Surface Effects in Adhesion, Friction, Wear, and Lubrication, Amsterdam: Elsevier, 1981
- [33] Zum Gahr, K.-H.: Microstructure and Wear of Materials. Tribology Series, Amsterdam: Elsevier, Vol. 10. 1987, 559
- [34] Archard, J.F.; Hirst, W.: The wear of metals under unlubricated conditions. Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, 1206(1956)236, 397-410
- [35] Bartenev, G.M.; Lavrentev, V.V.: Friction and Wear of Polymers. Tribology Series, Amsterdam: Elsevier, Vol. 6. 1981, 320
- [36] Lancaster, J.K.: Abrasive wear of polymers. Wear, 4(1969)14, 223-239
- [37] Czichos, H.: Tribology: A Systems Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication, and Wear, Amsterdam: Elsevier, 1978
- [38] Czichos, H.; Habig, K.-H.: Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik, Berlin: Springer, 2015

- [39] Künkel, R.: Auswahl und Optimierung von Kunststoffen für tribologisch beanspruchte Systeme. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), 2005
- [40] Johnney Mertens, A.; Kumar, P.; Senthilvelan, S.: The effect of the mating gear surface over the durability of injection-molded polypropylene spur gears. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 12(2016)230, 1401-1414
- [41] Zorko, D.; Kulovec, S.; Duhovnik, J.; Tavčar, J.: Durability and design parameters of a Steel/PEEK gear pair. *Mechanism and Machine Theory*, (2019)140, 825-846
- [42] Norm DIN 3960: Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder (Zylinderräder) und Stirnradpaare (Zylinderradpaare) mit Evolventenverzahnung. Berlin: Beuth, 1987
- [43] Evans, S.; Keogh, P.: Efficiency and running temperature of a polymer-steel spur gear pair form slip/roll ration fundamentals. *Tribology International*, (2016)97, 379-389
- [44] Brecher, C.; Löpenhaus, C.; Mevissen, D.: Zwei-Scheiben-Tribometer mit variablem Schlupfverlauf. *Antriebstechnik*, H, (2016)12, 54-61
- [45] Hutchings, I.; Shipway, P.: Design and selection of materials for tribological applications, in *Tribology (Second Edition)*, I. Hutchings and P. Shipway, Editors. 2017, Butterworth-Heinemann: Oxford. 283-302
- [46] Rabinowicz, E.: The Wear Coefficient—Magnitude, Scatter, Uses. *Journal of Lubrication Technology*, 2(1981)103, 188-193
- [47] Goodwin, A.; Walton, D.; Duke, B.: Some Characteristics of Dry-Running Steel Gears. *VDI Berichte*, (1996)1230, 345-356
- [48] Watson, H.J.: Materials and ratings for dry-running gears. *Wear*, 4(1962)5, 3-9
- [49] Alotaibi, J.; Yousif, B.; Yusaf, T.: Wear behaviour and mechanism of different metals sliding against stainless steel counterface. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 6(2014)228, 692-704
- [50] Takahashi, M.; Itagaki, T.; Takahashi, H.; Koide, T.; Kobori, Y.: Lifetime and meshing-teeth temperature of a crossed helical gear consisting of a plastic gear and a metal gear: In case of no-

- lubrication. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, 6(2017)11
- [51] Chen, Y.K.; Modi, O.P.; Mhay, A.S.; Chrysanthou, A.; O'Sullivan, J.M.: The effect of different metallic counterface materials and different surface treatments on the wear and friction of polyamide 66 and its composite in rolling-sliding contact. *Wear* (2003)255, 714-721
- [52] Kulkarni, M.V.; Elangovan, K.; Hemachandra Reddy, K.; Basappa, S.J.: Tribological behaviours of ABS and PA6 polymer-metal sliding combinations under dry friction, water absorbed and electroplated conditions. *Journal of Engineering Science and Technology*, 1(2016)11, 68-84
- [53] Mbarek, M.: Experimental study of the rolling-sliding contact conditions in a PA66/steel gear using twin-disc test rig: friction and wear analysis. *World Scientific*, 6(2015)22
- [54] Johnney Mertens, A.; Senthilvelan, S.: Effect of mating metal gear surface texture on the polymer gear surface temperature. 4th International Conference on Materials Processing and Characterization, (2015), 1763-1769
- [55] Pogačnik, A.; Kalin, M.: Parameters influencing the running-in and long-term tribological behaviour of polyamide (PA) against polyacetal (POM) and steel. *Wear*, (2012), 140-148
- [56] Pogačnik, A.; Kupec, A.; Kalin, M.: Tribological properties of polyamide (PA6) in self-mated contacts and against steel as a stationary and moving body. *Wear*, (2017)378, 17-26
- [57] Singh, P.K.; Siddhartha, A.K.S.: An investigation on the thermal and wear behavior of polymer based spur gears. *Tribology International*, (2018)118, 264-272
- [58] Tsukamoto, N.: Investigation about the Strength of Plastic Gears : 5th Report; Abrasion of Nylon Gear due to the Difference in Materials of Mating Gears. *Bulletin of JSME*, 24(1985)28, 1520-1527
- [59] Wieleba, W.: The statistical correlation of the coefficient of friction and wear rate of PTFE composites with steel counterface roughness and hardness. *Wear*, (2002)252, 719-729
- [60] Walton, D.; Goodwin, A.: The wear of unlubricated metallic spur gears. *Wear*, 2(1998)222, 103-113

- [61] Vlachopoulos, J.; Strutt, D.: Polymer processing. *Materials Science and Technology*, 9(2013)19, 1161-1169
- [62] Fu, H.; Xu, H.; Liu, Y.; Yang, Z.; Kormakov, S.; Wu, D.; Sun, J.: Overview of Injection Molding Technology for Processing Polymers and Their Composites. *ES Materials & Manufacturing*, (2020)8, 3-23
- [63] Friedrich, K.: Polymer composites for tribological applications. *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, 1(2018)1, 3-39
- [64] Roesler, J.: Zur Tragfähigkeitssteigerung thermoplastischer Zahnräder mit Füllstoffen. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2005
- [65] Yu, G.; Liu, H.; Mao, K.; Zhu, C.; Lu, Z.: Examination on the wear process of polyformaldehyde gears under dry and lubricated conditions. *Friction*, 3(2021)9, 538-550
- [66] Lange, K.; Kammerer, M.; Pöhlandt, K.; Schöck, J.: *Fließpressen: Wirtschaftliche Fertigung metallischer Präzisionswerkstücke*, Berlin: Springer, 2008
- [67] Norm DIN 8582: *Fertigungsverfahren Umformen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Alphabetische Übersicht*. Berlin: Beuth, 2003
- [68] Norm DIN 8583-6: *Fertigungsverfahren Druckumformen - Teil 6: Durchdrücken; Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Berlin: Beuth, 2003
- [69] Nshama, W.; Jeswiet, J.: Evaluation of temperature and heat transfer conditions at the metal-forming interface. *CIRP annals*, 1(1995)44, 201-204
- [70] Qin, Y.; Balendra, R.; Chodnikiewicz, K.: A method for the simulation of temperature stabilisation in the tools during multi-cycle cold-forging operations. *Journal of Materials Processing Technology*, (2000)107, 252-259
- [71] Sweeney, K.: *Kaltfließpressen von Schrägverzahnungen*. Dissertation, RWTH Aachen, 2000
- [72] Lennartz, J.: *Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnnten Getriebewellen*. Dissertation, RWTH Aachen, 1995

- [73] Friedhelm, J.: Fließpressen: Schrägverzahnungen lassen sich auch umformtechnisch präzise herstellen. *MaschinenMarkt*, 33(2008), 24-27
- [74] Schöck, J.; Kammerer, M.: Verzahnungsherstellung durch Kaltfließpressen. *Umformtechnik*, (1999)4, 36-42
- [75] Samanta, S.K.: Helical Gear: A Novel Method of Manufacturing. IT Proceedings of NAMRC, Batelle Columbus Laboratories (USA), IV(1976), 199-255
- [76] Koll, W.: Technologische Grenzen des Fließpressens von Evolventen-stirnrädern und Substitution spanender Zahnradfertigungs. *Präzisionsumformtechnik: Ergebnisse des Schwerpunktes „Präzisionsumformtechnik“ der Deutschen Forschungsgemeinschaft 1981 bis 1989*, (2013), 61
- [77] Keppler-Ott, T.: Optimierung des Querfließpressens schrägverzahnter Stirnräder. Dissertation, Universität Stuttgart, 2002
- [78] Kiener, C.: Kaltfließpressen von gerad-und schrägverzahnten Zahnrädern. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), 2020
- [79] Baumgarten, J.: Ansätze zur Kompensation der elastischen Matrizenaufweitung bei Kaltmassivumformprozessen. Dissertation, Universität Hannover, 2003
- [80] Szentmihályi, V.: Beitrag der Prozesssimulation zur Entwicklung komplexer Kaltumformteile. Dissertation, Universität Stuttgart, 1993
- [81] Schmieder, F.: Beitrag zur Fertigung von schrägverzahnten Stirnrädern durch Querfließpressen, Heidelberg, Berlin: Springer, 1992
- [82] Feldmann, H.D.: Fließpressen von Stahl, Heidelberg: Springer, 1959, 208
- [83] Barrett, C.S.; Massalski, T.B.: *Structure of Metals*. International Series on Materials Science and Technology, Oxford: Pergamon, Vol. 35. 1985, 706-720
- [84] Schmidt, W.v.: Kalt-Massivumformbarkeit, in *Werkstoffkunde Stahl*. 1984, Springer. 578-594

- [85] Hinzmann, R.: Nichteisenmetalle: Erster Teil Kupfer, Messing, Bronze, Rotguß, Berlin: Springer, 2013
- [86] Ostermann, F.: Anwendungstechnologie Aluminium, Berlin: Springer Vieweg, 2015
- [87] Choi, J.; Cho, H.; Kwon, H.: A new extrusion process for helical-gears: experimental study. *Journal of Materials Processing Technology*, 1(1994)44, 35-53
- [88] König, W.; Koll, W.: Kaltfließpressen von Bauteilen mit Verzahnungen. *Präzisionsumformtechnik*, ed. K. Lange: Springer, 1990, 193-213
- [89] Jonck, R.: Verarbeitungsverhalten wärmebehandelter Eisen-Kohlenstoff-Legierungen. *HTM Journal of Heat Treatment and Materials*, 5(1975)30, 255-260
- [90] Wang, J.-P.; Huang, G.-M.: Fine extrusion device approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 5-8(2016)86, 1733-1737
- [91] Alves, M.L.; Rodrigues, J.M.C.; Martins, P.A.F.: Cold forging of gears: experimental and theoretical investigation. *Finite Elements in Analysis and Design*, 6-7(2001)37, 549-558
- [92] Nock Jr, J.: Aluminum, Properties, Physical Metallurgy and Phase Diagrams. American Society for Metals, Metals Park, Ohio, (1967), 303
- [93] Jung, S.-Y.; Kang, M.-C.; Kim, C.; Kim, C.-H.; Chang, Y.-J.; Han, S.-M.: A study on the extrusion by a two-step process for manufacturing helical gear. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 7-8(2009)41, 684-693
- [94] Harthan, R.O.; Repenning, J.; Blanck, R.; Böttcher, H.; Bürger, V.; Emele, L.; Görz, W.K.; Hennenberg, K.; Jörß, W.; Ludig, S.: Treibhausgasminderungswirkung des Klimaschutzprogramms 2030 (Kurzbericht). (2020)
- [95] Varela, S.; Valbuena, O.; Armentia, J.; Larrucea, F.; Manso, V.; Santos, M.: Material saving by a combination of rotary forging and conventional processes: Hybrid forging for net-shape gear. *AIP Conference Proceedings*, 1(2019)2113, 040015
- [96] VDI 3138 - Blatt 2: Kaltmassivumformen von Stählen - Anwendung, Arbeitsspiele, Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für das Kaltfließpressen. Berlin: Beuth, 1999

- [97] Gupta, K.; Laubscher, R.; Davim, J.P.; Jain, N.: Recent developments in sustainable manufacturing of gears: a review. *Journal of Cleaner Production*, (2016)112, 3320-3330
- [98] Severin, F.: *Massiver Leichtbau–Potenziale massivumgeformter Komponenten*. Industrieverband Massivumformung e. V., Hagen. 2019
- [99] Lichtenegger, H.; Rammerstorfer, F.; Daxner, T.; Eichlseder, W.: *Leichtbauprinzipien*, in *Leichtbau*, H.P. Degischer and S. Lüftl, Editors. 2009, Wiley-VCH: Weinheim. 1-75
- [100] Geiger, M.; Lange, K.: *Fracture-Mechanics Analysis of Extrusion Dies*. *CIRP Annals*, 1(1991)40, 303-306
- [101] Noneder, J.: *Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen*. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), 2014
- [102] Rohrmoser, A.; Kiener, C.; Hagenah, H.; Merklein, M.: Influence of tribological conditions on application relevant component properties of cold forged gears. *Production Engineering*, 13(2019), 579-588
- [103] Tekkaya, A.E.: *Ermittlung von Eigenspannungen in der Kaltmassivumformung*. Universität Stuttgart, 2013
- [104] Soyarslan, C.; Tekkaya, A.E.; Akyuz, U.: Application of Continuum Damage Mechanics in discontinuous crack formation: Forward extrusion chevron predictions. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 6(2008)88, 436-453
- [105] Zucko, M.; Pöhlandt, K.; Pyzalla, A.; Reimers, W.; Kockelmann, H.: Berechnung der Umformeigenspannungen beim Fließpressen und Vergleich mit experimentellen Ergebnissen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 9(2004)28, 423
- [106] Polanyi, M.: Über eine Art Gitterstörung, die einen Kristall plastisch machen könnte. *Zeitschrift für Physik*, 9(1934)89, 660-664
- [107] Taylor, G.I.: The mechanism of plastic deformation of crystals. Part I.—Theoretical. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, 85(1934)145, 362-387

- [108] Hall, E.: The deformation and ageing of mild steel: III discussion of results. *Proceedings of the Physical Society. Section B*, 9(1951)64, 747
- [109] Bunge, H.J.: Entstehung von Verformungstexturen in metallischen Werkstoffen. *Kristall und Technik*, 6(1971)6, 677-728
- [110] Pessard, E.; Morel, F.; Morel, A.: The Anisotropic Fatigue Behavior of Forged Steel. *Advanced Engineering Materials*, 9(2009)11, 732-735
- [111] Kawasaki, Y.: High Precision (DIN 8 class) Forged Helical Gear-Manual Transaxle for Passenger Car. in *ICFG workshop Quality and Properties of Cold Forged Products and JSTP Forging Committee*. 2007.
- [112] Silbernagel, C.: Beitrag zum Präzisionsschmieden von Zahnrädern für Pkw-Getriebe. Dissertation, Universität Hannover, 2003
- [113] Exel, N.; Kaufmann, H.; Türk, M.: Einfluss des Faserverlaufs auf die Schwingfestigkeit von AFP-Stählen. *Schmiede-Journal*, (2011)3
- [114] Zimmermann, A.: Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), 2019
- [115] Rohrmoser, A.; Heling, B.; Schleich, B.; Kiener, C.; Hagenah, H.; Wartzack, S.; Merklein, M.: A methodology for the application of virtual evaluation methods within the design process of cold forged steel pinions. *Proceedings of the 22th International Conference on Engineering Design (ICED19)*, (2019)
- [116] Fernandes, P.J.L.: Tooth bending fatigue failures in gears. *Engineering Failure Analysis*, 3(1996)3, 219-225
- [117] Silveira, F.D.; Schaeffer, L.: Cold forging tool for gear accuracy grade improvement by a different shrink fitting method. *REM - International Engineering Journal*, 4(2018)71, 593-597
- [118] Andreas, K.; Merklein, M.: Influence of surface integrity on the tribological performance of cold forging tools. *Procedia CIRP*, (2014)13, 61-66
- [119] Lee, Y.; Lee, J.; Ishikawa, T.: Analysis of the elastic characteristics at forging die for the cold forged dimensional accuracy. *Journal of Materials Processing Technology*, (2002)130-131, 532-539

- [120] Kang, G.-J.; Kim, J.; Kang, B.-S.: Numerical and experimental evaluation for elastic deformation of a cold forging tool and workpiece for a sleeve cam of an automobile start motor. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2(2008)222, 217-224
- [121] Dubar, M.; Dubar, L.; Dubois, A.; Verleene, A.; Oudin, J.: Wear Criteria of Cold Forging Tools. Surface Engineering, 2(2013)17, 119-122
- [122] Hettig, A.: Einflußgrößen auf den Werkzeugbruch beim Voll-Vorwärts-Fließpressen, Berlin: Springer, Vol. 106. 1990
- [123] Wagener, H.-W.: Tribologische Untersuchungen zur Kaltmassivumformung: Shaker Verlag, 1999
- [124] Geiger, M.: Grundlagen des Durchdrückens und Durchziehens, in Umformtechnik Handbuch für Industrie und Wissenschaft, K. Lange, Editor. 1988, Springer: Berlin. 254-288
- [125] ICFG-Document: Tool Life & Tool Quality in Cold Forging, Part One: General Aspects of Tool Life, in Doc. 14/02. 2002, Meisenbach-Verlag Bamberg
- [126] VDI 3176: Vorgespannte Preßwerkzeuge für das Kaltmassivumformen. Berlin: Beuth, 1986
- [127] Pöhlandt, K.; Mucha, A.; Ruf, A.; Schmid, H.; Bartz, W.J.: Werkzeuge der Kaltmassivumformung: Grundlagen und Praxis, Renningen: expert Verlag, 2003
- [128] Upadhyaya, G.S.: Cemented Tungsten Carbides: Production, Properties and Testing, New Jersey: Noyes Publication, 1998, 420
- [129] Jütte, F.: Beitrag zum Präzisionsumformen von Stirnradverzahnungen. Dissertation, Universität Paderborn, 1986
- [130] Kang, J.-H.; Lee, K.-O.; Je, J.-S.; Kang, S.-S.: Spur gear forging tool manufacturing method considering elastic deformation due to shrink fitting. Journal of materials processing technology, (2007)187, 14-18
- [131] Behrens, B.-A.; Doege, E.: Cold sizing of cold-and hot-formed gears. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 1(2004)53, 239-242
- [132] ICFG-Document: Tool Life & Tool Quality in Cold Forging, Part Two: Quality Requirements for Tool Manufacturing, in Doc. 16/04. 2004, Meisenbach-Verlag: Bamberg

- [133] Kuzman, K.: Problems of accuracy control in cold forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 1-3(2001)113, 10-15
- [134] Groche, P.; Müller, C.; Jahn, A.: Effects of the Tool Lubrication in Cold Forging. *Tribology Letters*, 3(2014)53, 599-605
- [135] Kerspe, J.-H.: *Hydrostatisches Fließpressen: Verfahrensparameter und Werkstückeigenschaften*: Springer, Vol. 69. 2013
- [136] Kuzman, K.: Comments on the cold metal forming processes stability control. *Journal of materials processing technology*, 1-3(2007)185, 132-138
- [137] Leykamm, H.: *Beitrag zur Arbeitsgenauigkeit des Kaltmassivumformens*: Springer, Vol. 57. 2013
- [138] VDI 3138 - Blatt 1: *Kaltmassivumformung von Stählen und NE-Metallen: Grundlagen für das Kaltfließpressen*. Berlin: Beuth, 1998
- [139] VDI 3144: *Rohteilherstellung für das Kaltmassivumformen* Berlin: Beuth, 1988
- [140] Völkl, R.M.: *Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung*: Meisenbach-Verlag, 2007
- [141] ICFG-Document: *Lubrication aspects in cold forging of carbon steels and low alloy steels*, in *International Cold Forging Group*. 1991, *International Cold Forging Group*: Paris
- [142] Bay, N.: The state of the art in cold forging lubrication. *Journal of Materials Processing Technology*, 1-2(1994)46, 19-40
- [143] Groche, P.; Resch, F.: Dry forming of aluminum alloys – Wear mechanisms and influencing factors. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 8(2015)46, 813-828
- [144] Groche, P.; Zang, S.; Hayakawa, K.: *State of the art in phosphate-free lubrication in cold forging*. (2015)
- [145] Norm DIN 780-1: *Modulreihe für Zahnräder - Moduln für Stirnräder*. Berlin: Beuth, 1977
- [146] Kutzbach, K.: *Grundlagen und neuere Fortschritte der Zahnradherzeugung*, Berlin: VDI Verlag, 1925
- [147] Stölting, H.-D.; Janocha, H.: *Stellantriebe mit elektrischer Hilfsenergie*, in *Automatisierungstechnik 3 G. H.-J.*, Editor. 2000, Springer: Berlin. 87-137

- [148] Kodeeswaran, M.; Arnika, V.; Suresh, R.; Senthilvelan, S.: Bi-Directional and Uni-Directional Bending Fatigue Performance of Unreinforced and Carbon Fiber Reinforced Polyamide 66 Spur Gears. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 8(2016)17, 1025-1033
- [149] Schrader, T.; Shirgaokar, M.; Altan, T.: A critical evaluation of the double cup extrusion test for selection of cold forging lubricants. *Journal of materials processing technology*, 1(2007)189, 36-44
- [150] Buschhausen, A.; Weinmann, K.; Lee, J.Y.; Altan, T.: Evaluation of lubrication and friction in cold forging using a double backward-extrusion process. *Journal of materials processing technology*, 1-2(1992)33, 95-108
- [151] Rohrmoser, A.; Hagenah, H.; Merklein, M.: Adapted tool design for the cold forging of gears from non-ferrous and light metals. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 7-8(2021)113, 1833-1848
- [152] VDI 3186 - Blatt 2: Werkstoffe für Kaltfließpresswerkzeuge - Anleitung zur Gestaltung, Bearbeitung und Eigenschaftsverbesserung. Berlin: Beuth, 1997
- [153] Norm DIN EN ISO 75000-1: Metallische Werkstoffe - Kalibrierung und Überprüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen - Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen -Kalibrierung und Überprüfung der Kraftmesseinrichtung. Berlin: Beuth, 2018
- [154] Tekkaya, A.E.: A guide for validation of FE-simulations in bulk metal forming. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1(2005)30, 113-136
- [155] Volume A: Theory and User Information., in Marc® 2015, M.S. Corporation, Editor. 2015
- [156] Schwartzberg, F.: Crystal Structure Determines Behavior. *Source Book on Materials Selection: A Discriminative Selection of Outstanding Articles from the Periodical and Reference Literature*, (1977)1, 25
- [157] Clarebrough, L.; Hargreaves, M.: Work hardening of metals. *Progress in Metal Physics*, (1959)8, 1-103
- [158] Datenblatt - 16MnCr5. Saarstahl AG, 2016
- [159] Datenblatt - C15. Saarstahl AG, 2013

- [160] Datenblatt - CuZn37. Deutsches Kupferinstitut Berufsverband e.V., 2015
- [161] Datenblatt - Al99,5. AlCuMet GmbH & Co. KG, 2021
- [162] Datenblatt - AlMgSi1. ALUMERO Systematic Solutions GmbH, 2018
- [163] Hinzmann, R.: Die Wärmebehandlung und Gefügeausbildung von ( $\alpha$ +  $\beta$ )-Messing. Z. Metallkunde, (1927)19, 297-302
- [164] Fine, M.E.: Precipitation hardening of aluminum alloys. Metallurgical Transactions A, 4(1975)6, 625-630
- [165] Huppertz, W.: Grundlagen des Korrosionsschutzes für Aluminium als Konstruktionswerkstoff. Teil 2. Metall - Internationale Zeitschrift für Technik und Wirtschaft, 7-8(1995)49, 505-509
- [166] Herbers, H.: Einsatzhärten, in Härten und Vergüten des Stahles (Hardening and tempering of steel). 1947, Springer. 37-43
- [167] Norm DIN 50106: Prüfung metallischer Werkstoffe - Druckversuch bei Raumtemperatur. Berlin: Beuth, 2016
- [168] Hockett, J.; Sherby, O.: Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperatures. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2(1975)23, 87-98
- [169] Greve, A.: Werkstoffdaten in der Prozeßsimulation, in Wissens- und datenbankbasiertes Beratungssystem für die FE-Simulation von Umformprozessen. 1994, Springer. 73-95
- [170] Schmid, E.; Boas, W.: Theorien der kristallplastizität und-festigkeit, in Kristallplastizität. 1935, Springer. 279-301
- [171] Datenblatt - Ultramid® A3K - PA66. BASF SE, 2022
- [172] Palmer, R.J.: Polyamides, Plastics, in Encyclopedia of Polymer Science and Technology.
- [173] Datenblatt - ASP 2012. VARIO Edelstahl AG, 2020
- [174] Datenblatt - X40CrMoV5-1 (1.2344). HSM Stahl- und Metallhandel GmbH, 2019
- [175] Datenblatt - HS6-5-2C (1.3343). HSM Stahl- und Metallhandel GmbH, 2019
- [176] Böhlke, W.: Hartmetall – ein moderner Hochleistungswerkstoff. Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik, (2002)33, 575-580

- [177] VDI 2736 - Blatt 4: Thermoplastische Zahnräder - Ermittlung von Tragfähigkeitskennwerten an Zahnrädern. Berlin: Beuth, 2016
- [178] Norm ISO 25178-602: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft - Teil 602: Merkmale von berührungslos messenden Geräten (mit chromatisch konfokaler Sonde). Berlin: Beuth, 2011
- [179] Norm DIN EN ISO 4288: Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren-Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit. Berlin: Beuth, 1998
- [180] Norm DIN EN ISO 21920-2: Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Profile - Teil 2: Begriffe und Kenngrößen für die Oberflächenbeschaffenheit. Berlin: Beuth, 2022
- [181] Tekkaya, A.E.; Lange, K.: An Improved Relationship between Vickers Hardness and Yield Stress for Cold Formed Materials and its Experimental Verification. *CIRP Annals*, 1(2000)49, 205-208
- [182] Norm DIN EN ISO 14577-1: Metallische Werkstoffe – Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter – Teil 1: Prüfverfahren. Berlin: Beuth, 2015
- [183] Norm DIN EN ISO 6507-1: Metallische Werkstoffe – Härteprüfung nach Vickers – Teil 1: Prüfverfahren. Berlin: Beuth, 2018
- [184] Jütte, F.: Schrägverzahnungen lassen sich auch umformtechnisch präzise herstellen. *MaschinenMarkt*, (2008)33
- [185] Russ, J.C.: Fundamentals of energy dispersive X-ray analysis. *Monographs in materials*, Oxford: Butterworth-Heinemann, 2013
- [186] Schubert, D.; Rohrmoser, A.; Herzog, C.; Wolf, M.; Hagenah, H.; Merklein, M.; Drummer, D.: Influence of production process-induced surface topologies at varying roughness depths on the tribological properties of polyamide steel contact. *Journal of Polymer Engineering*, (2022)
- [187] Plančak, M.; Rosochowska, M.; Skakun, P.: Radial Extrusion of gear like Components - Numerical Analysis and Experiment. *Materials Science*, 5(2013)20, 891-896
- [188] Lee, Y.; Kwon, Y.; Lee, J.; Ishikawa, T.: Experimental and finite element analysis to predict the dimensional changes of a cold-forged spur gear. *Proceedings of the Institution of Mechanical*

- Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 7(2006)220, 1051-1057
- [189] Rohmoser, A.; Bode, C.; Schleich, B.; Hagenah, H.; Wartzack, S.; Merklein, M.: Influence of Metal Gear Tooth Geometry on Load and Wear within Metal-Polymer Gear Pairs. Applied Sciences, 1(2022)12, 270
- [190] Roth, K.: Zahnradtechnik Evolventen-Sonderverzahnungen zur Getriebeverbesserung: Evoloid-, Komplement-, Keilschräg-, Konische-, Konus-, Kronenrad-, Torus-, Wälzkolbenverzahnungen, Zahnrad-Erzeugungsverfahren, Berlin: Springer, Vol. 3. 2013
- [191] VDI 2736 - Blatt 2: Thermoplastische Zahnräder - Tragfähigkeitsberechnung. Berlin: Beuth, 2016
- [192] Ehrenstein, G.W.: Mit Kunststoffen konstruieren. 2007, Carl Hanser-Verlag: München
- [193] Hänisch, S.; Khalifa, N.; Tekkaya, A.; Nadolski, D.; Schulz, A.; Hoffmann, F.; Zoch, H.: Wirkzusammenhänge zwischen Kaltmassivumformung, Wärmebehandlung und Verzug am Beispiel einfacher Wellen. 2012. 26-33
- [194] Norm ISO 2768-1: Allgmeintoleranzen; Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung. Berlin: Beuth, 1991
- [195] Aspenes, G.; Hoiland, S.; Barth, T.; Askvik, K.M.: The influence of petroleum acids and solid surface energy on pipeline wettability in relation to hydrate deposition. J Colloid Interface Sci, 2(2009)333, 533-539
- [196] Pogosian, A.K.; Hovhannisyanyan, K.V.; Isajanyan, A.R.: Friction transfer and self-lubrication of polymers. Journal of Friction and Wear, 1(2010)31, 81-88
- [197] Bergseth, E.; Sjöberg, S.; Björklund, S.: Influence of real surface topography on the contact area ratio in differently manufactured spur gears. Tribology International, (2012)56, 72-80

## **Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen**

- [P1] Rohrmoser A.; Hagenah H.; Merklein M.: Berücksichtigung funktionsrelevanter Gestaltabweichungen bei der Auslegung von Umformprozessen zur Herstellung von Stirnrädern mit Sonderverzahnung durch Fließpressen. In: Wartzack, S. (Hrsg.): Industriekolloquium der Forschungsgruppe FOR 2271, Stamsried: Verlag Ernst Vögel, 2019, 26-29
- [P2] Rohrmoser A.; Heling B.; Schleich, B.; Hagenah H.; Merklein M.: Rohrmoser A.; Hagenah H.; Merklein M.: Ausgewählte Einflussgrößen auf die erzielbaren Verzahnungstoleranzen beim Kaltfließpressen. In: Wartzack, S. (Hrsg.): Summer School Toleranzmanagement - Beiträge zur 4. Summer School - September 2020, Stamsried: Verlag Ernst Vögel, 2020, 99-106
- [113] Rohrmoser, A.; Kiener, C.; Hagenah, H.; Merklein, M.: Influence of tribological conditions on application relevant component properties of cold forged gears. *Production Engineering*, (2019)13, 579-588
- [128] Rohrmoser, A.; Heling, B.; Schleich, B.; Kiener, C.; Hagenah, H.; Wartzack, S.; Merklein, M.: A methodology for the application of virtual evaluation methods within the design process of cold forged steel pinions. *Proceedings of the 22th International Conference on Engineering Design (ICED19)*, (2019)
- [165] Rohrmoser, A.; Hagenah, H.; Merklein, M.: Adapted tool design for the cold forging of gears from non-ferrous and light metals. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 7-8(2021)113, 1833-1848
- [P3] Rohrmoser, A.; Hagenah H.; Merklein, M.: Influence of the Forming Induced Hardening on the Wear Behavior of Aluminum Gears Within a Metal-Plastic Material Pairing and Targeted Adaption, *Procedia Manufacturing*, (2021)53, 189-196

- [201] Schubert, D.; Rohrmoser, A.; Herzog, C.; Wolf, M.; Hagenah, H.; Merklein, M.; Drummer, D.: Influence of production process-induced surface topologies at varying roughness depths on the tribological properties of polyamide steel contact. *Journal of Polymer Engineering*, (2022)
- [204] Rohrmoser, A.; Bode, C.; Schleich, B.; Hagenah, H.; Wartzack, S.; Merklein, M.: Influence of Metal Gear Tooth Geometry on Load and Wear within Metal-Polymer Gear Pairs. *Applied Sciences*, 1(2022)12, 270
- [P4] Rohrmoser, A.; Merklein, M.: Influence of Metal Flank Hardness of Machined and Cold Forged Gears on Wear within a Metal-Polyamide Gear Pair and Targeted Process Adaptation. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 4(2022)32

## **Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten**

- [S1] Trausenecker, F: Numerische Untersuchung ausgewählter Fertigungseinflussgrößen beim Kaltfließpressen einer geradzahnten Stirnradgeometrie. Bachelorarbeit (2018), Erlangen
- [S2] Diekmann, M: Experimentelle Untersuchung des Kaltfließpressens einer geradzahnten Stirnradgeometrie. Projektarbeit (2019), Erlangen
- [S3] Früchtnicht, T: Experimentelle Untersuchung des Kaltfließpressens einer geradzahnten Stirnradgeometrie. Projektarbeit (2019), Erlangen
- [S4] Rindl, M: Numerische Untersuchung des Kaltfließpressens einer geradzahnten Stirnradgeometrie. Bachelorarbeit (2019), Erlangen
- [S5] Freunek, J: Untersuchung des Verschleißverhaltens innerhalb der Materialpaarung Metall-Kunststoff in Hinblick auf den Einsatz fließgepresster Verzahnungen. Bachelorarbeit (2019), Erlangen
- [S6] Agca, T: Untersuchung grundlegender Einflussgrößen auf das Verschleißverhalten einer Stahl-Kunststoff-Getriebepaarung für den Einsatz in der Antriebstechnik. Projektarbeit (2019), Erlangen
- [S7] Hoffmann, A: Untersuchung des Einflusses verschiedener Schmiersysteme auf die tribologischen Bedingungen beim Kaltfließpressen von Leicht- und Nichteisenmetallen. Bachelorarbeit (2020), Erlangen
- [S8] Treviranus, J: Numerische Untersuchung des Kaltfließpressens von Verzahnungen aus Leicht- und Nichteisenmetallen. Projektarbeit (2020), Erlangen

- [S9] Harbauer, L: Untersuchung des Einflusses verschiedener Metallwerkstoffe auf das Verschleißverhalten von Metall-Kunststoff-Getriebepaarungen. Masterarbeit (2020), Erlangen
- [S10] Leicht, M: Experimentelle Untersuchung des Einflusses von Leicht- und Nichteisenmetallen beim Kaltfließpressen einer geradverzahnten Stirnradgeometrie. Projektarbeit (2020), Erlangen
- [S11] Al Yousef, M: Numerische Untersuchung ausgewählter Einflussgrößen auf das Kaltfließpressen einer geradverzahnten Stirnradgeometrie. Projektarbeit (2021), Erlangen
- [S12] Ismer, J: Untersuchung des Einflusses umforminduzierter Bauteileigenschaften auf das Verschleißverhalten von Metall-Kunststoff-Getriebepaarungen. Projektarbeit (2021), Erlangen
- [S13] Hoffmann, A: Untersuchung des Einflusses geometrischer Bauteilabweichungen auf das Verschleißverhalten von Metall-Kunststoff-Getriebepaarungen. Projektarbeit (2021), Erlangen
- [S14] Ismer, J: Experimentelle Untersuchung von werkzeugseitigen Stellhebeln auf die einsatzrelevanten Bauteileigenschaften fließgepresster Verzahnungen. Masterarbeit (2021), Erlangen
- [S15] Döllinger, A: Untersuchung des Einflusses der mechanischen Eigenschaften und des Lastfalls auf das Verschleißverhalten von Metall-Kunststoff-Getriebepaarungen. Masterarbeit (2021), Erlangen
- [S16] Graf, T: Untersuchung des Einflusses umforminduzierter Bauteileigenschaften auf das Verschleißverhalten trockenlaufender Getriebepaarungen. Bachelorarbeit (2022), Erlangen
- [S17] Binner, M: Untersuchung des Einflusses der fertigungsbedingten Bauteileigenschaften metallischer Zahnräder auf das Verschleißverhalten von Metall-Kunststoff-Getriebepaarungen. Masterarbeit (2022), Erlangen

# Reihenübersicht

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

<b>FAPS</b>	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
<b>FMT</b>	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
<b>KTmfk</b>	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
<b>LFT</b>	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
<b>LGT</b>	Lehrstuhl für Gießereitechnik
<b>LPT</b>	Lehrstuhl für Photonische Technologien
<b>REP</b>	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 Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen  
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.  
ISBN 3-446-15921-5.

**Band 9: Rainer Eisele**

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

**Band 10: Rolf Pfeiffer**

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

**Band 11: Herbert Fischer**

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

**Band 12: Gerhard Kleineidam**

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

**Band 13: Frank Vollertsen**

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

**Band 14: Stephan Biermann**

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern  
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991.  
ISBN 3-446-16269-0.

**Band 15: Uwe Geißler**

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

**Band 16: Frank Oswald Hake**

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

**Band 17: Herbert Reichel**

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

**Band 18: Josef Scheller**

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

**Band 19: Arnold vom Ende**

Untersuchungen zum Biegeumformung mit elastischer 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**

CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen  
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.  
ISBN 3-446-17104-5.

**Band 27: Günther Schäfer**

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

**Band 28: Martin Hoffmann**

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

**Band 29: Peter Hoffmann**

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

**Band 30: Olaf Schrödel**

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

**Band 31: Hubert Reinisch**

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

**Band 32: Brigitte Bärnreuther**

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

**Band 33: Joachim Hutfless**

Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage  
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

**Band 34: Uwe Günzel**

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

**Band 35: Bertram Ehmann**

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

**Band 36: Harald Kolléra**

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

**Band 37: Stephanie Abels**

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

**Band 38: Robert Schmidt-Heibel**

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

**Band 39: Norbert Lutz**

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

**Band 40: Konrad Grampp**

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

**Band 41: Martin Koch**

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

**Band 42: Armin Gropp**

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

**Band 43: Werner Heckel**

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

**Band 44: Armin Rothhaupt**

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

**Band 45: Bernd Zöllner**

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

**Band 46: Bodo Vormann**

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

**Band 47: Peter Schnepf**

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

**Band 48: Rainer Klotzbücher**

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

**Band 49: Wolfgang Greska**

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

**Band 50: Jörg Franke**

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

**Band 51: Franz-Josef Zeller**

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

**Band 52: Michael Solvie**

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

**Band 53: Robert Hopperdietzel**

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

**Band 54: Thomas Rebhahn**  
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung mit Excimerlasern - Systemkomponenten und Verfahrensoptimierungen  
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab.  
1996. ISBN 3-87525-075-3.

**Band 55: Henning Hanebuth**  
Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik  
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.  
1996. ISBN 3-87525-074-5.

**Band 56: Uwe Schönherr**  
Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden Robotern  
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab.  
1996. ISBN 3-87525-076-1.

**Band 57: Stefan Holzer**  
Berührungslose Formgebung mit Laserstrahlung  
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab.  
1996. ISBN 3-87525-079-6.

**Band 58: Markus Schultz**  
Fertigungsqualität beim 3D-Laserstrahlschweißen von Blechformteilen  
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab.  
1997. ISBN 3-87525-080-X.

**Band 59: Thomas Krebs**  
Integration elektromechanischer CA-Anwendungen über einem STEP-Produktmodell  
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab.  
1997. ISBN 3-87525-081-8.

**Band 60: Jürgen Sturm**  
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung in der Elektronikproduktion  
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab.  
1997. ISBN 3-87525-082-6.

**Band 61: Andreas Brand**  
Prozesse und Systeme zur Bestückung räumlicher elektronischer Baugruppen (3D-MID)  
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-087-7.

**Band 62: Michael Kauf**  
Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO<sub>2</sub>-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 Spulene Wickeln  
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 CO<sub>2</sub>-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**

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

**Band 81: Stefan Schubert**

Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO<sub>2</sub>-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 spritzgeossener 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 CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung  
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-122-9.

**Band 93: Adrianus L. P.**

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

**Band 94: Hans-Martin Biehler**

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

**Band 95: Wolfgang Becker**

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

**Band 96: Philipp Hein**

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

**Band 97: Gunter Beitinger**

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

**Band 98: Jürgen Knoblach**

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

**Band 99: Frank Breitenbach**

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

**Band 100: Bernd Falk**

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

**Band 101: Wolfgang Schlögl**

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

**Band 102: Christian Hinsel**

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

**Band 103: Stefan Bobbert**

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

**Band 104: Harald Rottbauer**  
Modulares Planungs- und Fertigungswerkzeug zum Produktionsmanagement in der Elektronikproduktion  
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-139-3.

**Band 105: Thomas Hennige**  
Flexible Formgebung von Blechen durch Laserstrahlumformen  
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-140-7.

**Band 106: Thomas Menzel**  
Wissensbasierte Methoden für die rechnergestützte Charakterisierung und Bewertung innovativer Fertigungsprozesse  
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.  
ISBN 3-87525-142-3.

**Band 107: Thomas Stöckel**  
Kommunikationstechnische Integration der Prozeßebene in Produktionssysteme durch Middleware-Frameworks  
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-143-1.

**Band 108: Frank Pitter**  
Verfügbarkeitssteigerung von Werkzeugmaschinen durch Einsatz mechatronischer Sensorlösungen  
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001. ISBN 3-87525-144-X.

**Band 109: Markus Korneli**  
Integration lokaler CAP-Systeme in einen globalen Fertigungsdatenverbund  
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001. ISBN 3-87525-146-6.

**Band 110: Burkhard Müller**  
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern - Prozeßparameter und Modelle zur Aktorkonstruktion  
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001. ISBN 3-87525-159-8.

**Band 111: Jürgen Göhringer**  
Integrierte Telediagnose via Internet zum effizienten Service von Produktionssystemen  
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-147-4.

**Band 112: Robert Feuerstein**  
Qualitäts- und kosteneffiziente Integration neuer Bauelementetechnologien in die Flachbaugruppenfertigung  
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001. ISBN 3-87525-151-2.

**Band 113: Marcus Reichenberger**  
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten alternativer Elektroniklote in der Oberflächenmontage (SMT)  
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001. ISBN 3-87525-152-0.

**Band 114: Alexander Huber**  
Justieren vormontierter Systeme mit dem Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren  
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001. ISBN 3-87525-153-9.

**Band 115: Sami Krimi**  
Analyse und Optimierung von Montagesystemen in der Elektronikproduktion  
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001. ISBN 3-87525-157-1.

**Band 116: Marion Merklein**  
Laserstrahlumformen von Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung der Mikrostruktur und der mechanischen Eigenschaften  
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001. ISBN 3-87525-156-3.

**Band 117: Thomas Collisi**  
Ein informationslogistisches Architekturkonzept zur Akquisition simulationsrelevanter Daten  
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-164-4.

**Band 118: Markus Koch**  
Rationalisierung und ergonomische Optimierung im Innenausbau durch den Einsatz moderner Automatisierungstechnik  
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002. ISBN 3-87525-165-2.

**Band 119: Michael Schmidt**  
Prozeßregelung für das Laserstrahl-Punktschweißen in der Elektronikproduktion  
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002. ISBN 3-87525-166-0.

**Band 120: Nicolas Tiesler**  
Grundlegende Untersuchungen zum Fließpressen metallischer Kleinstteile  
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-175-X.

**Band 121: Lars Pursche**  
Methoden zur technologieorientierten Programmierung für die 3D-Lasermikrobearbeitung  
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002. ISBN 3-87525-183-0.

**Band 122: Jan-Oliver Brassel**  
Prozeßkontrolle beim Laserstrahl-Mikroschweißen  
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002. ISBN 3-87525-181-4.

**Band 123: Mark Geisel**  
Prozeßkontrolle und -steuerung beim Laserstrahlschweißen mit den Methoden der nichtlinearen Dynamik  
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002. ISBN 3-87525-180-6.

**Band 124: Gerd Eßer**  
Laserstrahlunterstützte Erzeugung metallischer Leiterstrukturen auf Thermoplastsubstraten für die MID-Technik  
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-171-7.

**Band 125: Marc Fleckenstein**  
Qualität laserstrahl-gefügter Mikroverbindungen elektronischer Kontakte  
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002. ISBN 3-87525-170-9.

**Band 126: Stefan Kaufmann**  
Grundlegende Untersuchungen zum Nd:YAG-Laserstrahlfügen von Silizium für Komponenten der Optoelektronik  
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-172-5.

**Band 127: Thomas Fröhlich**  
Simultanes Löten von Anschlußkontakten elektronischer Bauelemente mit Diodenlaserstrahlung  
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002. ISBN 3-87525-186-5.

**Band 128: Achim Hofmann**

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

**Band 129: Ingo Kriebitzsch**

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

**Band 130: Thomas Pohl**

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

**Band 131: Matthias Wenk**

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

**Band 132: Matthias Negenandack**

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

**Band 133: Oliver Kreis**

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

**Band 134: Stefan Trautner**

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

**Band 135: Roland Meier**

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

**Band 136: Jürgen Wunderlich**

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

**Band 137: Stefan Novotny**

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

**Band 138: Andreas Licha**

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

**Band 139: Michael Eisenbarth**

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

**Band 140: Frank Christoph**

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

**Band 141: Hinnerk Hagenah**

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

**Band 142: Ralf Eckstein**

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

**Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff**

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

**Band 144: Andreas Kach**

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

**Band 145: Stefan Hierl**

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

**Band 146: Thomas Neudecker**

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

**Band 147: Ulrich Wenger**

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

**Band 148: Stefan Slama**

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

**Band 149: Thomas Wurm**

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

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

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

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

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

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

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

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

**Band 157: Markus Meiler**  
Großserientauglichkeit trocken-schmierstoffbeschichteter 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 Laserdurchstrahlschweißen von Kunststoffen  
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab.  
2006. ISBN 978-3-87525-243-9.

**Band 175: Peter Wölflick**

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

ISBN 978-3-87525-246-0.

**Band 176: Attila Komlodi**

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

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

**Band 177: Uwe Popp**

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

**Band 178: Veit Rückel**

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

**Band 179: Manfred Dirscherl**

Nicht-thermische Mikrojustier-technik mittels ultrakurzer Laserpulse

LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

**Band 180: Yong Zhuo**

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schalungsträger (3D-MID)

FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

**Band 181: Stefan Lang**

Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion

FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

**Band 182: Hans-Joachim Krauß**

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere

LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

**Band 183: Stefan Junker**

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten

FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

**Band 184: Rainer Kohlbauer**

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse

LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

**Band 185: Klaus Lamprecht**

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge

LFT, 135 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

**Band 186: Bernd Zolleiß**

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischerBaugruppen

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 wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen

LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

**Band 191: Ralf Völkl**

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung

LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

**Band 192: Massimo Tolazzi**

Innenhochdruck-Umformen verstärkter Blech-Rahmenstrukturen

LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

**Band 193: Cornelia Hoff**

Untersuchung der Prozesseinflussgrößen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5

LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

**Band 194: Christian Alvarez**

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Lötprozessen in der Elektronikproduktion

FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

**Band 195: Andreas Kunze**

Automatisierte Montage von makromechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-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 Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen  
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab.  
2008.  
ISBN 978-3-87525-280-4.

**Band 198: Stephan Roth**

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

**Band 199: Artur Giera**

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

**Band 200: Jürgen Lechler**

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

**Band 201: Andreas Blankl**

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

**Band 202: Andreas Schaller**

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

**Band 203: Claudius Schimpf**

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

**Band 204: Simon Dietrich**

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

**Band 205: Wolfgang Wolf**

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

**Band 206: Steffen Polster**

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

**Band 207: Stephan Manuel Dörfler**

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

**Band 208: Uwe Vogt**

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

**Band 209: Till Laumann**

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

**Band 210: Alexander Diehl**

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

**Band 211: Detlev Staud**

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

**Band 212: Jens Ackermann**

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

**Band 213: Stephan Weidel**

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

**Band 214: Stefan Geißdörfer**

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

**Band 215: Christian Matzner**

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

**Band 216: Florian Schüßler**

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

**Band 217: Massimo Cojutti**

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

**Band 218: Raoul Plettke**

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 Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion

FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-319-1.

**Band 222: Thomas Rechtenwald**

Quasi-isothermes Laserstrahl-sintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK

LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

**Band 223: Daniel Craiovan**

Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern

FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-324-5.

**Band 224: Kay Wagner**

Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen

LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

**Band 225: Martin Brandhuber**

Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten

LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

**Band 226: Peter Sebastian Feuer**

Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften:

Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

**Band 227: Murat Arbak**

Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics

LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

**Band 228: Indra Pitz**

Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen

LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

**Band 229: Alexander Grimm**

Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik

LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

**Band 230: Markus Kaupper**

Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit

LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

**Band 231: Thomas Kroiß**

Modellbasierte Prozessauslegung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung

LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

**Band 232: Christian Goth**

Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)

FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.

ISBN 978-3-87525-340-5.

**Band 233: Christian Ziegler**

Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie

FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

**Band 234: Florian Albert**

Automatisiertes Laserstrahl-löten 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 Elektrofahrzeugen  
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab.  
2014. ISBN 978-3-87525-362-7.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Band 264: Matthias Domke**

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

**Band 265: Johannes Götz**

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

**Band 266: Hung Nguyen**

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

**Band 267: Andreas Kuppert**

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

**Band 268: Kathleen Klaus**

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

**Band 269: Thomas Svec**

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

**Band 270: Tobias Schrader**

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

**Band 271: Matthäus Brela**

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

**Band 272: Michael Wieland**

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

**Band 273: René Schramm**

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

**Band 274: Michael Lechner**

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

**Band 275: Kolja Andreas**

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

**Band 276: Marcus Baum**

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

**Band 277: Thomas Schneider**

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

**Band 278: Jochen Merhof**

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

**Band 279: Fabian Zöller**

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

**Band 280: Christian Hezler**

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

**Band 281: Jochen Bönig**

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

**Band 282: Johannes Kohl**

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

**Band 283: Peter Bechtold**

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

**Band 284: Stefan Berger**

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

**Band 285: Martin Borschlegl**  
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 Unternehmenscontrollings 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-Laserstrahlweißßen 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 Werkerinformationssysteme 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 unterstützten 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) / Experimentelle Untersuchung, Modellierung, Simulation 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 Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.

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

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

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

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

**Band 311: Daniel 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 Stahlbleche LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

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

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

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

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

**Band 319: Tobias Konrad**  
Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im 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 Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

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

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

**Band 324: Susan Zöller**  
Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTMfK, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

**Band 325: Stefan Lutz**  
Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

**Band 326: Tobias Gnibl**  
Modellbasierte Prozesskettenabildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

**Band 327: Johannes Bürner**  
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher  
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-219-2.

**Band 328: Wolfgang Böhm**  
Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge  
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-227-7.

**Band 329: Stefan Landkammer**  
Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip  
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-229-1.

**Band 330: Stephan Rapp**  
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transients optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung  
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-235-2.

**Band 331: Michael Scholz**  
Intralogs Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten  
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-237-6.

**Band 332: Eva Bogner**  
Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung  
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-246-8.

**Band 333: Daniel Benjamin Krüger**  
Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion  
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-250-5.

**Band 334: Thomas Kuhn**  
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)  
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019.  
ISBN: 978-3-96147-252-9.

**Band 335: Hans Fleischmann**  
Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme  
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab. 2019.  
ISBN: 978-3-96147-256-7.

**Band 336: Markus Michalski**  
Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung  
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019.  
ISBN: 978-3-96147-270-3.

**Band 337: Markus Brandmeier**  
Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion  
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020.  
ISBN: 978-3-96147-275-8.

**Band 338: Stephan Purr**  
Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen  
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020.  
ISBN: 978-3-96147-281-9.

**Band 339: Christoph Kiener**  
Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern  
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-287-1.

**Band 340: Simon Spreng**  
Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißerimpprozesses  
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-293-2.

**Band 341: Patrik Schwingenschlögl**  
Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten  
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-297-0.

**Band 342: Emanuela Affronti**  
Evaluation of failure behaviour of sheet metals  
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-303-8.

**Band 343: Julia Degner**  
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umform- und Abschreckprozess  
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-307-6.

**Band 344: Maximilian Wagner**  
Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen  
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-309-0.

**Band 345: Stefan Härter**  
Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente  
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-314-4.

**Band 346: Toni Donhauser**  
Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation  
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-316-8.

**Band 347: Philipp Amend**

Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder. 2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

**Band 348: Matthias Ehlert**

Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

**Band 349: Thomas Sander**

Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

**Band 350: Florian Pilz**

Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

**Band 351: Sebastian Josef Katona**

Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometrie-Modelle KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

**Band 352: Jürgen Herrmann**

Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014 LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

**Band 353: Christof Küstner**

Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

**Band 354: Tobias Gläsel**

Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenumwicklungen für automobilen Traktionsantriebe FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

**Band 355: Andreas Meinel**

Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

**Band 356: Hannah Riedle**

Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

**Band 357: Maximilian Landgraf**

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

**Band 358: Alireza Esfandiyari**

Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

**Band 359: Christian Sand**

Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

**Band 360: Ralf Merkl**

Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

**Band 361: Thomas Reitberger**

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

**Band 362: Marius Christian Fechter**

Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

**Band 363: Franziska Neubauer**

Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethode zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

**Band 364: Eike Wolfram Schäfer**

Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

**Band 365: Daniel Gross**

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

**Band 366: Daniel Junker**

Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

**Band 367: Tallal Javied**

Totally Integrated Ecology Management for Resource Efficient and Eco-Friendly Production FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

**Band 368: David Marco Hochrein**

Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axial-schub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen – KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-420-2.

**Band 369: Daniel Gräf**

Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie  
FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-433-2.

**Band 370: Andreas Gröschl**

Hochfrequent fokusabstandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik  
FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-435-6.

**Band 371: Johann Tüchsen**

Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren  
KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-437-0.

**Band 372: Max Marian**

Numerische Auslegung von Oberflächenmikrotexturen für geschmierte tribologische Kontakte  
KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-439-4.

**Band 373: Johannes Strauß**

Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung  
LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder. 2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

**Band 374: Martin Hohmann**

Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy  
LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-445-5.

**Band 375: Timo Kordaß**

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen  
FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-443-1.

**Band 376: Philipp Kestel**

Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen  
KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-457-8.

**Band 377: Martin Lerchen**

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen  
FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-463-9.

**Band 378: Michael Schneider**

Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten  
FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-465-3.

**Band 379: Tobias Sprügel**

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering  
KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-475-2.

**Band 380: Tom Häfner**

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen  
LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-479-0.

**Band 381: Björn Heling**

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design  
KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-487-5.

**Band 382: Tobias Kolb**

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems  
LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-491-2.

**Band 383: Mario Meinhardt**

Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit  
LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-473-8.

**Band 384: Felix Bauer**

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik  
LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-498-1.

**Band 385: Jochen Zeitler**

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen  
FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-499-8.

**Band 386: Vincent Mann**

Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle  
LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-503-2.

**Band 387: Chen Chen**

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies

LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-505-6.

**Band 388: Stefan Stein**

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements

LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-507-0

**Band 389: Nikolaus Urban**

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten

FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-501-8.

**Band 390: Yiting Wu**

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022.

ISBN: 978-3-96147-513-1.

**Band 391: Thomas Papke**

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur

LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-515-5.

**Band 392: Bastian Zimmermann**

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht

LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-519-3.

**Band 393: Harald Völkl**

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen

KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-523-0.

**Band 394: Robert Schulte**

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-525-4.

**Band 395: Philipp Frey**

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

LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-534-6.

**Band 396: Thomas Johann Luft**

Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme

KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-540-7.

**Band 397: Li Wang**

Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen

FAPS, xxii u. 151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-542-1.

**Band 398: Sebastian Reitelshöfer**

Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten

FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-547-6.

**Band 399: Alexander Meyer**

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-555-1.

**Band 400: Rong Zhao**

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte

KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-557-5.

**Band 401: Christian P. J. Schwarzer**

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik

FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-566-7.

**Band 402: Alexander Horn**

Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung

LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-568-1.

**Band 403: Artur Klos**

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau

LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-572-8.

**Band 404: Harald Schmid**

Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehstücken auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen

LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-577-3.

**Band 405: Johannes Henneberg**

Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial

LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-579-7.

**Band 406: Anton Schmailzl**

Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlschweißen

LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-583-4.

**Band 407: Alexander Wolf**  
Modellierung und Vorhersage menschlichen Interaktionsverhaltens zur Analyse der Mensch-Produkt Interaktion  
KTmfk, x u. 207 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-585-8.

**Band 408: Tim Weikert**  
Modifikationen amorpher Kohlenstoffschichten zur Anpassung der Reibungsbedingungen und zur Erhöhung des Verschleißschutzes  
KTmfk, xvii u. 258 Seiten, 91 Bilder, 9 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-589-6.

**Band 409: Stefan Götz**  
Frühzeitiges konstruktionsbegleitendes Toleranzmanagement  
KTmfk, ix u. 276 Seiten, 127 Bilder, 13 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-593-3.

**Band 410: Markus Hubert**  
Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte  
FAPS, xviii u. 139 Seiten, 86 Bilder, 7 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-603-9.

**Band 411: Manfred Vogel**  
Grundlagenuntersuchungen und Erarbeitung einer Methodik zur Herstellung maßgeschneiderter Halbzeuge auf Basis eines neuartigen flexiblen Walzprozesses  
LFT, ix u. 176 Seiten, 61 Bilder, 11 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-605-3.

**Band 412: Michael Weigelt**  
Multidimensionale Optionenanalyse alternativer Antriebskonzepte für die individuelle Langstreckenmobilität  
FAPS, xv u. 222 Seiten, 89 Bilder, 38 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-607-7.

**Band 413: Frank Bodendorf**  
Machine Learning im Cost Engineering des Supply Managements  
FAPS, xiii u. 165 Seiten, 75 Bilder, 13 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-609-1.

**Band 414: Maximilian Metzner**  
Planung und Simulation taktiler, intelligenter und kollaborativer Roboterfähigkeiten in der Montage  
FAPS, xix u. 174 Seiten, 72 Bilder, 3 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-611-4.

**Band 415: Tina Buker**  
Ein Ansatz zur Reduktion produktinduzierter Nutzerstigmatisierung durch Förderung einer gleichermaßen gebrauchstauglichen wie emotionalen Produktgestalt  
KTmfk, x u. 236 Seiten, 54 Bilder, 44 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-613-8.

**Band 416: Marlene Kuhn**  
Model-based Traceability System Development for Complex Manufacturing Applying Blockchain and Graphs  
FAPS, xv u. 167 Seiten, 63 Bilder, 10 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-615-2.

**Band 417: Benjamin Lengenfelder**  
Remote photoacoustic sensing using speckle-analysis for biomedical imaging  
LPT, xv u. 124 Seiten, 86 Bilder, 10 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-617-6.

**Band 418: Benjamin Pohrer**  
Analyse des Zusammenhangs zwischen dem tribochemischen Aufbau von Grenzschichten und der Ausbildung von White Etching Crack-Schäden  
KTmfk, xv u. 258 Seiten, 103 Bilder, 10 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-621-3.

**Band 419: Matthias Friedlein**  
Zuverlässigkeitsmethoden zur Beschleunigung von Qualifizierungsuntersuchungen für Steckkontakte  
FAPS, xxv u. 162 Seiten, 98 Bilder, 7 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-625-1.

**Band 420: Thomas Stoll**  
Laser Powder Bed Fusion von Kupfer auf Aluminiumoxid-Keramik  
FAPS, xxvii u. 236 Seiten, 103 Bilder, 11 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-631-2.

**Band 421: Eric Eschner**  
Relation of Particle Motion and Process Zone Formation as a Basis for Sensing Approaches within PBF-LB/M  
LPT, xiv u. 143 Seiten, 87 Bilder, 0 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-633-6.

**Band 422: Fanuel Mehari**  
Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) as a diagnostics tool for biological tissue analysis.  
LPT, xv u. 145 Seiten, 68 Bilder, 12 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-641-1.

**Band 423: Uwe Leicht**  
Ultraschallüberlagertes Umformen und Verstemmen von Stahlwerkstoffen  
LFT, xi u. 165 Seiten, 65 Bilder, 6 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-643-5.

**Band 424: Thomas Braun**  
Potenzialanalyse der plasmabasierten, strukturierten Metallisierung thermoaktiver Oberflächen im industriellen Hausbau  
FAPS, xvii u. 152 Seiten, 72 Bilder, 11 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-653-4.

**Band 425: Reinhardt Seidel**  
Modellbasierte Optimierung des Selektivwellenlötprozesses  
FAPS, xxii u. 167 Seiten, 73 Bilder, 23 Tab. 2023.  
ISBN: 978-3-96147-651-0.

**Band 426: Matthias Lenzen**  
Maßgeschneiderte Werkstoffcharakterisierung für die numerische Auslegung von Blechumformprozessen  
LFT, xi u. 187 Seiten, 77 Bilder, 13 Tab. 2023.  
ISBN: 978-3-96147-663-3.

**Band 427: Matthias Graser**  
Analyse lokaler Kurzzeitwärmebehandlungsmethoden zur Verbesserung des Umformverhaltens und der Bauteileigenschaften von Aluminiumstrangpresshohlprofilen  
LFT, xi u. 169 Seiten, 81 Bilder, 1 Tab. 2023.  
ISBN: 978-3-96147-666-4.

**Band 428: Markus Lieret**

Sicheres autonomes Flugrobotersystem für den Einsatz im Produktions- und Logistikumfeld  
FAPS, xix u. 198 Seiten, 54 Bilder, 7 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-668-8.

**Band 429: Petar Vukovic**

Simulation komplexer Kommunikationssysteme in der Fertigungsautomatisierung  
FAPS, xiv u. 163 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2023.  
ISBN 978-3-96147-673-2.

**Band 430: Fabian Knieps**

Finite Elemente Simulation dünnschichtiger Verpackungsstähle: Entwicklung einer geeigneten Charakterisierungs- und Validierungsstrategie  
LFT, xix, 189 Seiten, 122 Bilder, 17 Tab. 2023  
ISBN 978-3-96147-689-3

**Band 431: Julian Seßner**

Multimodale Bildsegmentierung gering strukturierter Umgebungen für die Navigation am Beispiel eines Assistenzsystems für sehbeeinträchtigte Personen  
FAPS, xxv, 203 Seiten, 57 Bilder, 25 Tab. 2023  
ISBN 978-3-96147-697-8

**Band 432: Benjamin Samuel****Lutz**

Smart Manufacturing System for Process Optimization Regarding Deviations among Material Batches  
FAPS, xix, 208 Seiten, 77 Bilder, 14 Tab. 2023  
ISBN 978-3-96147-703-6

**Band 433: Michael Jüttner**

Bewertung von Kantenpressungen auf Basis von Simulationen mehrfach überrollter elasto-plastischer Kontakte  
KTmfk, xii, 162 Seiten, 59 Bilder, 7 Tab. 2024  
ISBN 978-3-96147-713-5

**Band 434: Sebastian Wiesemayer**

Untersuchungen zur Stoffflusssteuerung beim Fügen durch Umformen von hochfesten Aluminiumlegierungen mittels lokaler Kurzzeitwärmebehandlung  
LFT, xii u. 197 Seiten, 81 Bilder, 19 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-715-9.

**Band 435: Clara-Maria Kuball**

Grundlegende Untersuchungen zur umformtechnischen Herstellung von Halbhohlstanzen aus hochverfestigenden Werkstoffen  
LFT, viii u. 180 Seiten, 64 Bilder, 13 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-717-3.

**Band 436: Martin Roth**

Sampling-based Tolerance-Cost Optimization: The Key to Optimal Tolerance Allocation  
KTmfk, xxxvii u. 337 Seiten, 97 Bilder, 56 Tab. 2024.  
ISBN 978-3-96147-719-7.

**Band 437: Stephan Schirdewahn**

Verbesserung des tribologischen Einsatzverhaltens im Presshärteprozess durch Verwendung maßgeschneiderter laserimplantierter Werkzeuge  
LFT, viii u. 177 Seiten, 63 Bilder, 7 Tab. 2024  
ISBN 978-3-96147-721-0.

**Band 438: Andreas Rohrmoser**

Erarbeitung eines grundlegenden Verständnisses zum Fließpressen betriebsangepasster Verzahnungen für den Einsatz in der Materialpaarung Metall-Kunststoff  
LFT, x u. 166 Seiten, 94 Bilder, 6 Tab. 2024  
ISBN: 978-3-96147-723-4.

## Abstract

Gears represent integral and essential machine elements. For applications in the low and medium power range, the use of dry-running gears of the metal-polymer material pairing is promising, as the specific advantages of both materials are combined. However, wear occurs during operation, which limits compliance with functionally relevant tolerances and the service life. Within the pairing, the properties of the metallic partner significantly influence the wear behavior, which is why its manufacturing-related component properties are of decisive importance. Against this background, the use of cold forging for gear manufacturing offers potential due to short process times, high material efficiency as well as good achievable mechanical properties and a high resulting surface quality. Challenges, however, are the low gear accuracy as well as high tool loads.

In order to increase the application potential of cold forged gears in the material pairing metal-polymer and to reduce wear, a fundamental understanding of operation-adapted manufacturing is developed within this work. This includes the determination of parameters influencing the wear behavior of the metallic gearing and the identification of the wear mechanisms that occur. Furthermore, measures for the full forward extrusion of ready-to-use gears are investigated. For this purpose, influencing variables on the process and component properties as well as the underlying cause-effect relationships are determined. Based on this, control levers will be derived for systematically influencing the forming-induced component properties of cold forged gears. Finally, recommendations are derived for the manufacture of operation-adapted, ready-to-use metallic gears for the metal-polymer material combination by cold forging.

Zahnräder stellen integrale und unverzichtbare Maschinenelemente dar. Für Anwendungen im niedrigen und mittleren Leistungsbereich ist der Einsatz trockenlaufender Zahnradgetriebe der Materialpaarung Metall-Kunststoff vielversprechend, da die spezifischen Vorteile beider Werkstoffe kombiniert werden. Im Betrieb tritt allerdings Verschleiß auf, wodurch die Einhaltung der funktionsrelevanten Toleranzen und die Lebensdauer des Getriebes begrenzt werden. Innerhalb der Paarung beeinflussen die Eigenschaften des metallischen Partners das Verschleißverhalten wesentlich, weshalb dessen fertigungsbedingten Bauteileigenschaften eine entscheidende Bedeutung zukommt. Vor diesem Hintergrund bietet der Einsatz des Kaltfließpressens zur Verzahnungsherstellung Potential aufgrund kurzer Prozesszeiten, einer hohen Materialeffizienz sowie guten erzielbaren mechanische Eigenschaften und einer hohen resultierenden Oberflächengüte. Herausforderungen sind allerdings die geringe Verzahnungsgenauigkeit sowie eine hohe Werkzeugbeanspruchung.

Um das Einsatzpotential fließgepresster Zahnräder in der Materialpaarung Metall-Kunststoff zu steigern und den Verschleiß zu reduzieren, wird in dieser Arbeit ein grundlegendes Verständnis zur betriebsangepassten Herstellung erarbeitet. Dies beinhaltet die Ermittlung von Einflussgrößen der metallischen Verzahnung auf das Verschleißverhalten sowie die Identifikation der auftretenden Verschleißmechanismen. Des Weiteren werden Maßnahmen zum Fließpressen einsatzfertiger Verzahnungen erforscht. Hierzu werden Einflussgrößen auf die Prozess- und Bauteileigenschaften sowie die zugrundeliegenden Wirkzusammenhänge ermittelt. Aufbauend darauf werden Stellhebel zur systematischen Beeinflussung der umforminduzierten Bauteileigenschaften der fließgepressten Verzahnungen entwickelt. Abschließend werden anwendungsgerechte Empfehlungen zur Herstellung betriebsangepasster, einsatzfertiger metallischer Zahnräder für die Materialpaarung Metall-Kunststoff durch Kaltfließpressen abgeleitet.

