



FAU Studien aus dem Maschinenbau 339

Christoph Kiener

Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnradern

Christoph Kiener

Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 339

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Christoph Kiener

**Kaltfließpressen von
gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern**

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

Erlangen
FAU University Press
2020

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

Bitte zitieren als

Kiener, Christoph. 2020. *Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten
Zahnradern*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 339. Erlangen:
FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-288-8.

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

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS Server
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

Verlag und Auslieferung:

FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-287-1 (Druckausgabe)

eISBN: 978-3-96147-288-8 (Online-Ausgabe)

ISSN: 2625-9974

DOI: 10.25593/978-3-96147-288-8

**Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten
Zahnradern**

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

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Christoph Kiener, M.Sc.

aus Sulzbach-Rosenberg

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

Tag der mündlichen

Prüfung: 11.12.2019

Vorsitzender des

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

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein
Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Inhalte dieser Arbeit wurden im Rahmen der Forschungsprojekte „Ressourceneffiziente Herstellung einsatzfertiger Zahnräder durch Kaltmassivumformung (Green Factory Bavaria)“ und „Ermittlung und Erweiterung der Prozessgrenzen beim Kaltfließpressen von Zahnrädern im „Samanta“-Verfahren (Bayerische Forschungstiftung)“ erarbeitet.

Mein Dank gilt der Ordinaria des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie, Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein, für die wissenschaftliche Betreuung bei der Erstellung der Arbeit. Das entgegengebrachte Vertrauen während meiner Forschungsaktivitäten und der Leitung der Forschungsgruppe „Massivumformung“ hat meinen Werdegang stets positiv beeinflusst.

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack danke ich für die Übernahme des Koreferats. Bei PD Dr.-Ing. Heinz Werner Höppel und Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Dr. h.c. mult. Manfred Geiger bedanke ich mich für Ihre Mitwirkung im Zuge meines Promotionsverfahrens als fachfremder Gutachter und Prüfungsvorsitzender.

Weiterhin gilt mein Dank den Kollegen am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie für die angenehme und produktive Zusammenarbeit. Auch möchte ich der Buchhaltung, der Systemadministration und den technischen Mitarbeitern für ihre Unterstützung danken.

Insbesondere danke ich Florian Pilz für seine äußerst wertvolle Unterstützung, die deutlich über das übliche Maß war und ist. Zudem möchte ich Patrik Schwingenschlögl, Johannes Henneberg, Andreas Rohmoser, Martin Killmann, Alexander Horn, Andreas Jobst, Jennifer Tenner und Maria Löffler für die konstruktive und vertrauensvolle Zusammenarbeit danken.

Abschließend gilt mein besonderer Dank meiner Familie, meiner Verlobten Sarah und meinen Freunden, die mir während meines Lebenswegs stets Rückhalt bieten und mich jederzeit unterstützen.

Nürnberg, im Dezember 2019

Christoph Kiener

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik und Forschung	3
2.1 Kaltfließpressen von Zahnrädern	4
2.1.1 Potentiale und Herausforderungen	4
2.1.2 Verfahrensarten.....	9
2.2 Ansätze zur vorteilhaften Beeinflussung des Prozessergebnisses.....	13
2.2.1 Werkzeugtechnik.....	13
2.2.2 Wirkfuge	17
2.2.3 Werkstück.....	18
2.3 Zusammenfassende Bewertung	19
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	21
4 Angewendete Werkstoffe, Schmiersysteme, Anlagen und Verfahren	25
4.1 Werkstoffe.....	25
4.1.1 Zahnräder.....	25
4.1.2 Werkzeuge.....	26
4.2 Anlagen	27
4.3 Schmierstoffsystem	28
4.4 Messverfahren zur Ermittlung der Bauteileigenschaften	30
4.4.1 Genauigkeit.....	30
4.4.2 Mechanische Eigenschaften.....	32
5 Prozesse zur Zahnradherstellung.....	35
5.1 Festlegung der Zahnradgeometrien	35
5.2 Auslegung und Aufbau der Prozesse.....	36
5.3 Prozessführungsstrategie	39
5.4 Charakterisierung der Bauteil- und Prozesseigenschaften.....	42
5.5 Vergleichende Betrachtung von Gerad- und Schrägverzahnungen....	51
5.6 Virtuelle Prozessmodellierung.....	52

6	Ermittlung von Wirkzusammenhängen zwischen Zahnradparametern und Prozessgrößen	57
6.1	Numerische Einflussanalyse und deren Ursachen	57
6.1.1	Zähnezahl	58
6.1.2	Modul und Schrägungswinkel.....	66
6.2	Verifizierung der numerischen Erkenntnisse	77
6.3	Abgleich Experiment und Simulation	85
7	Erforschung von Methoden zur Prozessbeeinflussung	89
7.1	Aufzeigen von Forschungsansätzen und Methoden zur Prozessbeeinflussung	89
7.2	Numerische Einflussanalyse und deren Ursachen	90
7.2.1	Verzahnungseinlaufradius	91
7.2.2	Reibung.....	97
7.3	Verifizierung der numerischen Erkenntnisse	103
8	Empfehlungen für die Zahnradherstellung.....	113
8.1	Erarbeitung eines Prozessverständnisses	113
8.1.1	Zähnezahl	113
8.1.2	Modul und Schrägungswinkel.....	115
8.2	Ableitung von Auslegungshinweisen.....	119
8.2.1	Werkzeugtechnik	120
8.2.2	Wirkfuge	124
8.2.3	Werkstück	125
8.3	Bewertung der Erkenntnisse.....	126
9	Zusammenfassung und Ausblick	127
10	Summary and outlook	129
	Literaturverzeichnis	131

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

<i>Symbol</i>	<i>Einheit</i>	<i>Beschreibung</i>
a	mm	Voreilen von Material im Bauteilmittbereich (schematisch)
b	mm	Zahnbreite
b/d _T	-	Breiten-Durchmesser-Verhältnis
d _K	mm	Kopfkreisdurchmesser
d _T	mm	Teilkreisdurchmesser
m	mm	Modul
n _H	%	Nutzbare Höhe
n _{Hübe}	-	Anzahl der Hübe
n _{Knoten}	-	Anzahl der Knoten
n _{Proben}	-	Anzahl der Proben
n _{Zähne}	-	Anzahl der Zähne
n _{Zahnräder}	-	Anzahl der Zahnräder
u	mm	(Werkzeug-)Deformation (schematisch)
v _{Mitte}	mm/s	Fließgeschwindigkeit Stofffluss Bauteilzentrum (schematisch)
v _{Traverse}	mm/min	Geschwindigkeit Traverse
v _{Verzahnung}	mm/s	Fließgeschwindigkeit Stofffluss Verzahnungsbe- reich (schematisch)
z	-	Zähnezahl
A _{Querschnitt}	mm ²	Querschnittsfläche
A _{Randkörner}	mm ²	Fläche der Randkornsicht
F _A	-	Kraftanteil axial (schematisch)
F _L	-	Kraftanteil lateral (schematisch)
F _{Relativ}	kN/mm ³	Relative Prozesskraft
F _{Zahn}	kN	Prozesskraft je Zahn
F _α	μm	Profil-Gesamtabweichung
F _β	μm	Flankenlinien-Gesamtabweichung
R	%	Verhältnis von A _{Randkörner} zu A _{Querschnitt}
V _{Kern}	mm ³	Volumen im Bauteilkern (schematisch)
β	°	Schrägungswinkel
σ _{Max}	MPa	Maximale Hauptspannung

σ_{Min}	MPa	Minimale Hauptspannung
$\sigma_{\text{v.Mises}}$	MPa	Vergleichsspannung nach von Mises
ϕ	-	Umformgrad
3D	-	Dreidimensional
CAD	-	Computer Aided Design
DIN	-	Deutsches Institut für Normung
EDM	-	Electrical Discharge Machining (Erodieren)
FE	-	Finite Elemente
GVZ	-	Geradverzahnung
HRC	-	Härte nach Rockwell
HV	-	Härte nach Vickers
ICFG	-	International Cold Forging Group
IT	-	ISO-Toleranzklasse
PVD	-	Physical Vapour Deposition
SVZ	-	Schrägverzahnung
TiCN	-	Titancarbonitrid
VDI	-	Verein Deutscher Ingenieure

1 Einleitung

Die Umformtechnik ist ein wesentlicher Bestandteil in unserem täglichen Leben, da bis zu 20 % der Bruttoinlandsprodukte von Industrieländern aus der Umformindustrie stammen [1]. Produkte für die Automobilbranche [2], Luft- und Raumfahrt [3] sowie Medizintechnik [4] werden unter anderem durch Umformprozesse hergestellt. Unter den vorherrschenden Megatrends wie Globalisierung [5], Leichtbau [6] und Umweltbewusstsein [7] hat sich diese Produktionstechnologie in Richtung flexibler, automatisierter und umweltfreundlicher Prozesse entwickelt [8]. Die Gestaltung von effizienteren Produktionsprozessen ist für Unternehmen von zentraler Bedeutung um ihre zukünftige Marktposition zu sichern oder auszubauen [9]. Auch führen Trends wie die Realisierung von Leichtbaukonstruktionen zu einem Umdenken innerhalb bestehender Produktionsketten [10].

In der Antriebs- und Getriebetechnik zählen Zahnräder zu den am häufigsten verwendeten Komponenten in modernen Fahrzeug- und Maschinenbausystemen [11]. Zahnradgetriebe überzeugen durch hohe Effizienz, Betriebssicherheit und -dauer bei kompakter Bauraumgröße [12]. Aus diesen Gründen stellen sie trotz hoher Anforderungen an Konstruktion und Fertigungstechnik rund 80 % der mechanischen Antriebe dar [12]. Bei dieser Art von Getriebe werden Gerad- und Schrägverzahnungen einzeln oder in Kombination eingesetzt [11].

Zur Zahnradherstellung kommen aufgrund der erreichbaren Fertigungsgenauigkeit standardmäßig spanende Verfahren zur Anwendung [13]. Unter wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten bietet das Kaltfließpressen aufgrund kürzerer Fertigungszyklen und erhöhter Materialeffizienz eine Alternative [14]. Zudem sind kaltfließgepresste Zahnräder durch eine prozessbedingte Verfestigung und eine faserähnliche Gefügestruktur im Einsatz belastbarer [15]. Die industrielle Anwendung von Kaltfließpressverfahren ist aufgrund bauteil- und prozessbezogener Faktoren mit Herausforderungen konfrontiert [16].

Eine Variante des Vorwärtsfließpressens zur Herstellung von Zahnrädern ist das sogenannte "Samanta"-Verfahren [17]. Bei diesem Prozess werden mehrere Rohlinge sequentiell durch die formgebende Matrize gepresst, indem die Umformung eines Rohlings unterbrochen und ein weiterer in das Werkzeugsystem eingelegt wird [18]. Der entscheidende Vorteil dieser Prozessführung gegenüber klassischen Quer- und Vorwärtsfließ-

pressverfahren besteht darin, dass kein Auswerfervorgang erforderlich ist [17]. Neben einem positiven Effekt auf die erreichbare Mengenleistung [19] wird eine Beeinflussung der Bauteilgenauigkeit beim Auswerfen der umgeformten Bauteile aus dem Werkzeugsystem vermieden [20]. Um das "Samanta"-Verfahren in der Industrie einsetzen zu können, sind die erzielbare Verzahnungsqualität und die erreichbaren Werkzeugstandmengen zu steigern [21].

Vor diesem Hintergrund fokussiert diese Arbeit auf die Ermittlung von funktionalen Zusammenhängen zwischen Zahnradparametern und Prozessgrößen zur Schaffung eines grundlegenden Prozessverständnisses für das Kaltfließpressen von Zahnrädern im „Samanta“-Verfahren. Auch ist die Erforschung von Methoden zur vorteilhaften Beeinflussung des Prozessergebnisses für die Ableitung von praxisrelevanten Empfehlungen zur Prozessauslegung ein zentraler Bestandteil dieser Arbeit.

Auf Grundlage von empirischem Praxis- und Literaturwissen werden Prozesse für das Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern nach dem „Samanta“-Prinzip ausgelegt und Bauteile aus gängigen Stahlwerkstoffen abgepresst. Um die Zahnradprozesse simulativ abbilden und systematisch untersuchen zu können, werden für diese FE-Modelle aufgebaut. Anhand der charakterisierten Bauteil- und Prozesseigenschaften der unterschiedlichen Zahnradgeometrien werden sowohl Erkenntnisse in Bezug auf deren Einfluss auf das Prozessergebnis als auch Gemeinsamkeiten und Unterschiede bei der Herstellung innerhalb der Verzahnungsarten erarbeitet. Zudem werden die Simulationsmodelle durch den Abgleich mit den Ergebnissen aus den Experimenten validiert.

In numerischen Untersuchungen werden praxisrelevante Maßnahmen zur vorteilhaften Beeinflussung des Prozessergebnisses untersucht und Empfehlungen abgeleitet. Mit diesem Wissen werden die konventionell ausgelegten Prozesse angepasst und erneut Zahnräder hergestellt. Von wesentlicher Bedeutung sind die Quantifizierung einer potentiellen Verbesserung des Prozessergebnisses und die Analyse der Wirksamkeit innerhalb unterschiedlicher Zahnradgeometrien, insbesondere zwischen Gerad- und Schrägverzahnungen.

2 Stand der Technik und Forschung

Zahnräder zählen bei der Antriebs- sowie Getriebeherstellung zu den am häufigsten eingesetzten Maschinenelementen in modernen Fahrzeug- und Maschinenbausystemen [11]. Vorteilhafte Charakteristika von Zahnradgetrieben sind neben dem erzielbaren Wirkungsgrad eine zuverlässige Betriebssicherheit, wodurch ihnen ein enormer wirtschaftlicher Stellenwert zukommt [11].

Eingesetzt werden diese in verschiedenen Anwendungsbereichen vom einstufigen Industriegetriebe über Schalt- sowie Automatikgetriebe im Automobilbau bis hin zu Großgetrieben in Windkraftanlagen [22]. Einen bedeutenden Absatzmarkt stellt die Automobilbranche mit einem jährlichen Einbauvolumen im Milliardenbereich dar [23]. In modernen Fahrzeugen ist eine Vielzahl von Zahnradgetrieben verbaut [11]. Unter anderem werden diese im Antriebsstrang in Form mehrstufiger Schaltgetriebe und im Fahrzeuginneren zur Spiegel- und Sitzverstellung sowie in elektrischen Fensterhebern eingesetzt [22].

Zahnradgetriebe werden anhand ihrer Bauart unter anderem in Stirnrad-, Kegelrad-, Kegelstirnrad- und Schneckengetriebe differenziert [24]. Aufgrund ihrer vergleichsweise einfachen und robusten Bauweise werden überwiegend Stirnradgetriebe eingesetzt [25]. Weiterhin überzeugt diese Bauart gegenüber anderen Getriebearten hinsichtlich des erreichbaren Wirkungsgrades durch eine direkte mechanische Übertragung, einer geringeren Masse bezogen auf die übertragbare Leistung sowie einer höheren Tragfähigkeit [26]. In der Praxis werden in Stirnradgetrieben Gerad- und Schrägverzahnungen einzeln sowie in Kombination eingesetzt [11]. Aufgrund der Funktionalität von Zahnrädern sind sie eine integrale, unverzichtbare Bauteilkomponente für Antriebs- und Getriebe-systeme [27]. In Anbetracht des vorherrschenden industriellen Wettbewerbs [28] und dem damit verbundenen Kostendruck in der Automobilzulieferbranche, streben unter anderem Unternehmen im Bereich der Zahnradfertigung nach kontinuierlicher Effizienz- und Produktivitätssteigerung bei gleichzeitiger Kostenreduzierung [29]. Der Fokus liegt hierbei auf der Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und dem Aufbau tragfähiger Wissens- und Produktionsstrukturen [30].

Spanende Fertigungsverfahren, wie das Wälzfräsen [31] und -stoßen [31], bilden aufgrund einer hohen Fertigungsgenauigkeit [13] und flexibler Bearbeitungsmöglichkeiten [32] derzeit den Stand der Technik zur

Verzahnungsherstellung. Hinsichtlich ökonomischer, ökologischer und technischer Aspekte bieten umformtechnische Herstellverfahren eine vielversprechende Verfahrenstechnologie [33]. Vorteile liegen gegenüber spanenden Prozessen unter anderem in kürzeren Fertigungszeiten und einer höheren Materialeffizienz [34]. Insbesondere die Kaltmassivumformung überzeugt hierbei aufgrund einer charakteristischen energie- [35] und materialeffizienten [36] Herstellung hochbeanspruchbarer präziser Stahlbauteile [37].

2.1 Kaltfließpressen von Zahnrädern

Das Fließpressen zählt im Bereich der (Kalt-)Massivumformung zu den Hauptverfahren und wird üblicherweise für die Produktion von endkonturnahen Bauteilen eingesetzt [38]. Bedeutendster Abnehmer von Kaltfließpressteilen sind die Automobilindustrie und deren Zulieferer [39]. Fließpressverfahren werden nach der Werkstückgeometrie und der Werkzeughauptbewegung klassifiziert [39]. Während der Umformung wird durch einen Stempel [40] ein Materialfluss in Längs- und/oder Querrichtung in die formgebenden Werkzeugkavitäten initiiert [32]. Die Formgebung erfolgt grundsätzlich bei Raumtemperatur [41], wobei in der Wirkzone zwischen Werkstück und Werkzeug lokale Temperaturspitzen von über 100°C möglich sind [42]. Durch Kaltfließpressen ist für Zahnräder ein breites Bauteilspektrum realisierbar [43]. Ziel ist es, einbaufertige Gerad- und Schrägverzahnungen [32] - sogenannte „near-net-shape“ Umformteile [44] - prozesssicher und wirtschaftlich zu produzieren, um die Endkontur eines Produktes in möglichst frühen Wertschöpfungsstufen herzustellen [45].

2.1.1 Potentiale und Herausforderungen

Das stetige Wachstum der Automobilbranche [46] sowie gegenwärtige Gesetzgebungen und zunehmender politischer Druck erfordern energieeffiziente und ressourcenschonende Produktionstechnologien [47]. Ökonomische und ökologische Produktionsvorteile sind bei der kaltfließpresstechnischen Herstellung von Zahnrädern gegenüber klassischen Zerspanungsprozessen erreichbar [32]. Ferner bewirkt das durch die Kaltumformung erzielte technologische Eigenschaftsprofil der Zahnräder eine erhöhte Beanspruchbarkeit [48] und folglich eine Steigerung der Betriebsdauer im Anwendungsfall [49]. In der industriellen Praxis begegnet die Etablierung von Kaltfließpressprozessen zur Zahnradherstellung aufgrund bauteil- und prozessseitiger Faktoren Herausforderungen [16].

Ökonomische und ökologische Vorteile

Das Kaltfließpressen von Zahnrädern ist gegenüber Zerspanungsprozessen eine energieeffizientere Produktionstechnologie [50]. Einsparungen von bis zu 50 % des erforderlichen Energieaufwands pro Bauteil sind hierbei realisierbar [51]. Durch eine Umformung bei Raumtemperatur ist zudem grundsätzlich kein zusätzlicher Energiebeitrag infolge einer Temperierung der Werkzeuge und/oder Werkstücke erforderlich [19]. Reduzierte Fertigungszeiten [52] und mengenmäßig größere Stückzahlen [53] durch eine vergleichsweise einfache Prozessführung [54] wirken sich zusätzlich vorteilhaft auf die Energiebilanz aus. Ein weiteres vorteilhaftes charakteristisches Merkmal der kaltfließpresstechnischen Herstellung ist die Materialeffizienz [55]. Im Vergleich zu spanenden Prozessen ist der Materialbedarf um rund 10 bis 50 % geringer [51]. Dieser Vorteil kommt insbesondere für aufwendigere Bearbeitungen mit vergleichsweise hohem Zerspanungsvolumen zum Tragen [50].

Beanspruchungsgerechte Bauteileigenschaften

Neben einer wirtschaftlichen und nachhaltigen Produktionsmethode [14], sind durch das Kaltfließpressen bauteilbezogene technologische Vorteile erreichbar [56]. Dies resultiert in einer erhöhten Bauteilbeanspruchbarkeit kaltfließgepresster Zahnräder im Vergleich zu baugleichen spanend hergestellten [72]. Im Sinne des Leichtbauprinzips [57] ist dies im Zuge der Bauteilauslegung und -dimensionierung von entscheidender Bedeutung zur Bauraum- und Gewichteinsparung [58]. Auch ist das verbesserte Eigenschaftsprofil mitunter ausreichend für die Belastungsanforderungen im Einsatzfall [32], wodurch dem Umformprozess nachgeschaltete Wärmebehandlungsprozesse vermieden werden können [59]. Hingegen werden bei der zerspanenden Herstellung mitunter Defekte in die Oberfläche eingebracht [60], was zu einer Reduzierung der Bauteilbeanspruchbarkeit führt [61].

Geometrie

Das Fließpressen bietet grundsätzlich eine geometrische Flexibilität bei der Bauteilgestalt [62] und die Integration von Nebenformelementen wie Kupplungsverzahnungen [52]. In der Zerspanungstechnik limitiert ein prozessbedingter erforderlicher Werkzeugauslauf die Gestaltungsfreiheit der Zahnform [52]. Eine beanspruchungsgerechte Auslegung der Zahnfußgeometrie, zur Reduzierung versagenskritischer Spannungen im Belastungsfall, ist ein weiterer vorteilhafter Aspekt [63].

Oberfläche

Aufgrund der hohen Kontaktnormalspannungen während des Kaltfließpressens zwischen Werkzeug und Werkstück sowie der auftretenden Relativbewegung werden Rauheitsspitzen eingelätet [64] und vergleichsweise hohe Oberflächenqualitäten/-güten erzielt [65]. Dies hat Einfluss auf das Laufverhalten im Einsatzfall und reduziert auftretende Geräuschemissionen [66]. Während der Umformung treten Riss-schließeffekte an der Bauteiloberfläche auf, wodurch das Beanspruchungsniveau der Zahnräder vorteilhaft beeinflusst wird [67]. In der Oberfläche werden zudem Druckeigenspannungen induziert [68], welche grundsätzlich einer Rissinitiierung und -ausbreitung entgegenwirken [69].

Kaltverfestigung

Das Fließpressen bewirkt eine verfahrensbedingte Kaltverfestigung des Werkstoffgefüges [70] und eine merkliche Festigkeitszunahme im Verzahnungsbereich [71]. Insbesondere an den Zahnflanken resultiert eine erhöhte Verschleißfestigkeit [54]. Durch das umforminduzierte verbesserte Eigenschaftsprofil ist eine Werkstoffsubstitution durch Verwendung einer kostengünstigeren Stahlqualität möglich [72].

Faserstruktur

Das Kaltfließpressen hat Einfluss auf das Werkstoffgefüge [73] und erzeugt eine faserähnliche Struktur [41]. Die Veränderung der Gefügestruktur hat direkte Auswirkungen auf das resultierende Beanspruchbarkeitslevel der Zahnräder im Anwendungsfall [54]. Dieser mechanische Eigenschaftsvorteil wurde unter anderem in den Untersuchungen von Breuer [74], Exel et al. [75] und Rupp [76] wissenschaftlich nachgewiesen. Zurückführen ist dieser Effekt auf die zumeist parallel zur faserähnlichen Struktur verlaufenden Belastungen im Einsatz [54].

Herausforderungen

Die Potentiale für das Kaltfließpressen von Bauteilen sind aus ökonomischer, ökologischer und technischer Sicht vorhanden [77]. Trotz der genannten Vorteile ist diese Produktionsmethode zur Zahnradherstellung in der industriellen Praxis noch nicht standardmäßig etabliert [29]. Als wesentliche Herausforderungen gelten die erreichbare Präzision der Verzahnung [56] sowie unzureichende Werkzeugstandmengen [78] bedingt durch die erhöhte Werkzeugbeanspruchung [20].

Verzahnungsgenauigkeit

Verzahnungen werden hinsichtlich ihrer Funktion zwischen Lauf- und Mitnahmeverzahnungen differenziert [19]. Laufverzahnungen sind gerad- oder schrägverzahnte zylindrische Außen- oder Innenverzahnungen, deren Drehmoment- sowie Drehzahlübertragung durch Abwälzen realisiert wird [19]. Mitnahmeverzahnungen sind innen- oder außenverzahnte Profilverzahnungen auf Wellen oder Naben, die als feste sowie lösbare Kupplungen eingesetzt werden können [19]. Die Form- und Maßhaltigkeit ist ein entscheidendes Kriterium in der Verzahnungsherstellung - unabhängig von der Art der Verzahnung - zur Gewährleistung einer entsprechenden Leistung, Laufruhe und Lebensdauer [19]. In der Automobilbranche sind mitunter Toleranzklassen von 6 erforderlich [32]. Die Fertigung von Bauteilen mit endkonturnahen oder einbaufertigen Verzahnungsqualitäten setzt ein umfassendes grundlegendes Verständnis beim Kaltfließpressen voraus [79]. Die Interaktion der beteiligten Komponenten bewirkt werkstück-, werkzeug- und prozessspezifische Einflussfaktoren auf die Maßhaltigkeit, deren gezielter Berücksichtigung im Stadium der Prozessauslegung eine bedeutende Rolle zukommt [79].

Aus bauteilseitiger Sicht beeinflusst das Formfüllungs- und Fließverhalten die erreichbare Genauigkeit [80]. Der Materialfluss ist unter anderem von den plastischen Werkstoffeigenschaften und der geforderten Bauteilgeometrie abhängig [79]. Beim Zurückfahren des Stempels nach dem Umformvorgang kommt es zu einer Entlastung und Rückfederung von Werkstück und Werkzeug [81]. Im Fall ausgeprägter elastischer Werkzeugdehnungen während des Kaltfließpressens bedingt die Rückfederung der Werkzeuge ein erneutes plastisches Fließen des Werkstückwerkstoffes [81]. Dieser Effekt wird als sekundäres Fließen bezeichnet und beeinflusst die Bauteilgenauigkeit [82]. Auch nach der Entnahme der kaltfließgepressten Bauteile aus dem formgebenden Werkzeug treten Rückfederungsmechanismen auf und führen zu Maß- und Formänderungen [83]. Grund ist die Reversion des elastischen Anteils, die das Bauteil während der Umformung erfährt [84]. Die Dissipation der induzierten Umformenergie [85] sowie lokal erhöhte Temperaturentwicklungen in der Wirkzone [42] können - auch bei der Kaltumformung - zu Effekten wie Werkstückschrumpfungen führen [86].

Den eingesetzten Werkzeugen und deren Herstellungsgenauigkeit kommt eine Schlüsselrolle zu, da diese die erreichbaren Verzahnungsqualitäten direkt bestimmen und limitieren [87]. Während des industriellen Einsatzes der Werkzeuge verändern Verschleiß und plastische Deformati-

onen formgebende Werkzeugkavitäten und bedingen Maßänderungen am Bauteil [88]. Im Zuge der Prozessauslegung ist dieser Effekt durch beanspruchungsgerechte Werkzeuggeometrien, die Auswahl geeigneter Werkstoffe und -beschichtungen und zuverlässiger Tribosysteme reduzierbar [39]. Die auftretenden Kontaktdrücke beim Fließpressen bewirken elastische Deformationen der Werkzeuge [89], die mitunter von der Höhe und deren Verteilung [89] sowie der Steifigkeit des Werkzeugsystems beeinflusst werden [90]. Die erforderliche Umformarbeit wird beim Kaltfließpressen überwiegend in Wärme umgesetzt [91] und teilweise auch in die eingesetzten Werkzeuge übertragen. In der Folge resultieren thermisch bedingte Dehnungen, die Auswirkungen auf die Maßgenauigkeit der zu fertigenden Bauteile haben [92]. Eine elastische Matrizenaufweitung wurden von Koll [21] und Lennartz [53] experimentell nachgewiesen und war bei Baumgarten [79], Jütte [29], Keppler-Ott [93], Laufer [92], Schmieder [94], Sweeney [95], Szentmihály [96] im Fokus numerischer Analysen.

Prozessseitig hat die verwendete Umformmaschine und deren Maschinengenauigkeit während des Einsatzes infolge Auffederungen, Stempelkippung und -versatz Einfluss auf die erzielbare Verzahnungsgenauigkeit kaltfließgepresster Bauteile [97]. Mögliche Streuungen in der Fertigungsqualität resultieren auch durch eine schwankende Reproduzierbarkeit des Maschinenverhaltens [20].

Werkzeugbeanspruchung und -standmenge

Das Kaltfließpressen erfordert hohe Prozesskräfte [98] und stellt entsprechende Anforderungen an das Werkzeug- und Maschinensystem [99]. Für die Herstellkosten von Bauteilen sind die Werkzeugkosten von zentraler Bedeutung [100] und bilden neben Rohteil- und Lohnkosten einen wesentlichen Kostenfaktor [101]. Bei standardmäßigen Anwendungsfällen betragen die direkten Werkzeugkosten rund 5 bis 10 % [102] der gesamten Herstellkosten. Für anspruchsvollere Bauteilgeometrien - wie Verzahnungen - ist ein Anstieg auf bis zu 30 % möglich [103]. Die auftretenden Kontaktdrücke während der Umformung bewirken ausgeprägte versagenskritische Werkzeugbeanspruchungen mit lokalen Spannungskonzentrationen [104]. In der Folge wird die Lebensdauer von Werkzeugen oftmals frühzeitig limitiert [105]. Klassische Versagensursachen sind Ermüdung und Verschleiß [106]. Insbesondere beim Fließpressen von Verzahnungskonturen im industriellen Einsatz gelten die erreichbaren Werkzeugstandmengen als wesentliche Herausforderung [53]. Die Standmenge besitzt unmittelbaren Einfluss auf die direkten und indirekten

Werkzeugkosten [104]. Neben direkten Kosten wie Werkzeugbeschaffung, -herstellung und -nacharbeit fallen indirekte Kosten aufgrund von Rüstzeiten und resultierenden Maschinenstillstandzeiten an [72]. Zudem hat eine Streuung in den Werkzeugstandmengen aufgrund einer reduzierten Planbarkeit der Produktion Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Umformprozesses [100]. Die Erforschung von Maßnahmen zur Reduzierung der auftretenden Beanspruchung und/oder Erhöhung der erreichbaren Beanspruchbarkeit der Werkzeuge besitzt bedeutendes wirtschaftliches Potential und nimmt daher eine Schlüsselrolle ein.

2.1.2 Verfahrensarten

Im Bereich des Kaltfließpressens zur Zahnradherstellung gelten die Verfahrensklassen des Quer- und Vorwärtsfließpressens als Kernprozesse [92]. Eine besondere Form des Vorwärtsfließpressens stellt das sogenannte „Samanta“-Verfahren dar [17]. Teilweise werden für Sonderanwendungen auch weitere Verfahren und deren Kombination angewendet, wie Napfformstauchen [29] oder Quer- und Napfrückwärtsfließpressen [95], wobei diesen für einen Einsatz in Serienanwendungen eine untergeordnete Rolle zukommt.

Querfließpressen

Beim Querfließpressen ist die Hauptfließrichtung des Werkstoffs quer zu Stempelbewegung orientiert [107]. Durch einen Stempel wird der Rohling während des Umformvorgangs in die formgebende Matrize gepresst und initiiert einen radial nach außen orientierten Materialfluss in die Verzahnungskavitäten [53]. Nach erfolgter Umformung wird das Bauteil durch ein Auswerfersystem ausgestoßen, wofür eine horizontale Teilung des Werkzeugsystems erforderlich ist [18].

Für geradverzahnte Zahnräder werden Toleranzklassen im Bereich von 6 bis 9 erreicht [95]. Im Fall von Schrägverzahnungen sind Zahnräder mit Toleranzklassen von 8 bis 10 herstellbar [96].

Die Herstellung von Zahnrädern mittels Querfließpressen bietet den Vorteil, gratlose Bauteile mit durchgehender Verzahnung zu fertigen [53]. Hierdurch fällt ein vergleichsweise geringer Aufwand zur spanende Bearbeitung der Stirnseiten an oder ist mitunter vermeidbar [53].

Für ungünstige Aspektverhältnisse kommt es jedoch unter Umständen zu einer konkaven Zahnausfüllung über die Bauteilhöhe [95] und/oder einer Werkstofftrennung an der Fließscheide [50]. Durch eine ungleichmäßige Verfestigung über den Bauteilquerschnitt ist es zudem möglich, dass im

Einsatzfall infolge von Kerbwirkungen die Bauteilbeanspruchbarkeit negativ beeinflusst wird [108]. Während des Umformvorgangs bedingen hohe Stempel- und Werkzeugschließkräfte elastische Verformungen des Werkzeugs [95], wodurch die Maßhaltigkeit beeinträchtigt wird [109]. Der erforderliche Auswerfvorgang der umgeformten Bauteile hat insbesondere für schrägverzahnte Zahnräder aufgrund der hohen Prozesskräfte negative Auswirkungen auf die erzielbare Verzahnungsgenauigkeit [18]. Auch besteht die Gefahr eines vorzeitigen Werkzeugbruchs aufgrund fehlender Vorspannung während des Auswerfens [53].

Als wesentliche Herausforderung beim Querfließpressen von Zahnrädern gilt somit der Auswerfvorgang der kaltfließgepressten Bauteile. Für die Herstellung von Schrägverzahnungen existieren Ansätze, das Auswerfersystem drehbar zu lagern, um das Prozessergebnis zu verbessern [95].

Inhalt der Untersuchungen von Kondo et al. [110] war die Vermeidung einer konkaven Zahnausformung im Bauteilrandbereich. Mithilfe eines ringförmigen Rohlings, der konvex an der Mantelfläche ausgeformt ist, wurde eine verbesserte Formgenauigkeit erreicht. Dieser Ansatz ist jedoch nur anwendbar, insofern eine Anpassung des Rohlings zulässig ist. Ein Methode zur Erhöhung der Bauteilgenauigkeit beim Querfließpressen von schrägverzahnten Zahnrädern, durch Korrektur der formgebenden Werkzeuggeometrie, wurde von Szentmihályi [96] untersucht. Aufbauend auf den Arbeiten von Schmieder [94] und Szentmihályi [96] erforschte Keppler-Ott [18] eine Maßnahme zur Anpassung der Stempel- und Rohnteilform, wobei ein positiver Einfluss auf die Verzahnungsgenauigkeit nachgewiesen wurde. Baumgarten [79] erarbeitete ein Konzept zur Kompensation der elastischen Matrizenaufweitung während der Umformung, wodurch die Maßhaltigkeit verbessert wurde.

Vorwärtsfließpressen

Im Vergleich zum Querfließpressen wird beim Vorwärtsfließpressen der Rohling in Richtung der Stempelbewegung durch die formgebende Werkzeugöffnung gedrückt und ein axialer Materialfluss hervorgerufen [111]. Nach dem Umformvorgang wird das umgeformte Werkstück durch ein Auswerfersystem aus der Matrize ausgestoßen [95].

Geradverzahnte Zahnräder sind mit einer Toleranzklasse von 8 bis 10 herstellbar [50], wohingegen bei schrägverzahnten diese im Bereich von 10 bis 11 liegen [53]. Gegenüber dem Querfließpressen werden somit tendenziell geringere Bauteilgenauigkeiten erzielt.

Vorteilhaft beim Vorwärtsfließpressen sind im Vergleich zu anderen Fließpressverfahren niedrigere erforderliche Pressenkräfte, aufgrund des geringeren umgeformten Volumens sowie einer in Pressrichtung offen verzahnten Matrize [53]. Dies hat auch einen vorteilhaften Effekt auf das integrale Werkzeugbeanspruchungsniveau.

Nachteilig ist, dass auf der unteren Stirnseite im Verzahnungsbereich eine unvollständige Formfüllung vorliegt - ein sogenannter Einlaufbereich - der eine spanende Nachbearbeitung erfordert [95]. Da der Stempel meist nicht verzahnt ausgeführt ist, ist aufgrund einer Kollisionsvermeidung ein vollständiges Durchdrücken der Rohlinge durch die Matrize nicht möglich [53]. Mit einem verzahnten Stempel sind nahezu gratfreie Bauteile herstellbar, wodurch der Bearbeitungsaufwand an der oberen Stirnseite reduziert wird [53]. Dies bedingt jedoch eine präzise Prozessführung, um Werkzeugschäden zu vermeiden [21].

Der erforderliche Auswerfervorgang der umgeformten Bauteile benötigt hohe Prozesskräfte und gilt als wesentliche Herausforderung [53]. Insbesondere im Fall von Schrägverzahnungen ist neben hohen Kräften ein negativer Einfluss auf die Maßhaltigkeit die Folge [53]. Um diesem entgegenzuwirken, existieren Ansätze, die eingesetzte Matrize drehbar zu lagern und die Rotationsbewegung in ein Lager abzuleiten [95].

Lennartz [53] verwendete einen verzahnten Stempel, der während der Umformung in die schrägverzahnte Matrize eintaucht und das Bauteil aus dem Werkzeugsystem ausstößt. Dies erfordert jedoch eine rotatorische Lagerung des Stempels und eine dementsprechend aufwendige Prozessführung. In Forschungsarbeiten von Jütte [112] wurde eine werkzeugseitige Geometrieangepassung im Bereich der Umformzone der Matrize untersucht, um den Stofffluss zu steuern und damit die Maßhaltigkeit der Bauteile verbessern zu können.

„Samanta“-Verfahren

Das sogenannte „Samanta“-Verfahren ist eine Variante des Vorwärtsfließpressens [17]. Bei diesem auch als „Fließpressen im Paket“ bezeichneten Verfahren [94] werden mehrere Rohlinge sequentiell durch die formgebende Matrize gepresst, indem die Umformung eines Rohlings unterbrochen und ein weiterer Rohling in das Werkzeugsystem eingelegt wird [18]. Infolge dieser Prozessführung ist kein Auswerfersystem erforderlich [17].

Mit diesem Prozess sind Verzahnungsgenauigkeiten mit einer Toleranzklasse im Bereich von 10 bis 11 herstellbar [21]. Diese Präzision wurde für gerad- und schrägverzahnte Zahnräder erzielt [21].

Die Vermeidung eines Auswerfervorgangs ist vorteilhaft in Bezug auf einen verkürzten Prozessablauf [17] und die Mengenleistung [19]. Zudem wird eine Beeinflussung der Verzahnungsqualität - im Vergleich zu anderen Fließpressverfahren - beim Auswerfen der umgeformten Bauteile aus dem Werkzeugsystem vermieden [20].

Analog zum konventionellen Vollvorwärtsfließpressen entsteht an der unteren Stirnseite ein Einzugsbereich [18]. Auf der oberen Stirnseite resultiert ein prozessspezifischer kronenförmiger Bereich [18]. Beide Bauteilbereiche erfordern eine spanende Nachbearbeitung vor dem Einsatz um planparallele Flächen zu erhalten [53].

Um die Potentiale des „Samanta“-Verfahrens durch Vermeidung eines zusätzlichen Auswerfervorgangs gegenüber dem Quer- und Vorwärtsfließpressen nutzen zu können, gelten die erzielbare Bauteilgenauigkeit und die erreichbaren Werkzeugstandmengen als wesentliche Herausforderung [21].

Koll [21] erforschte eine angepasste Matrizengeometrie im Verzahnungseinlauf für schrägverzahnte Matrizen, mit der eine Erhöhung der Bauteilgenauigkeit sowie eine Reduzierung der Werkzeugbeanspruchung erreicht wurde. Choi et al. [113] untersuchten die Auswirkungen einer modifizierten Matrizenkontur mit geradverzahntem Einlauf und anschließender Schrägverzahnung, wobei keine Verbesserung der Verzahnungsgenauigkeit festgestellt wurde. Ferner bedingt diese Werkzeuganpassung eine aufwendige Werkzeugherstellung. Aufbauend auf diesen Untersuchungen modifizierten Jung et al. [71] diese Methode und entwickelten eine zweistufige Umformung mit zwischengeschalteter Wärmebehandlung. Aufgrund der Verwendung von zwei Werkzeugen und der zusätzlichen Wärmebehandlung ist diese Herangehensweise weniger wirtschaftlich. König et al. [114] analysierten den Einfluss der Werkzeuggeometrie und des Schmierstoffes auf die erreichbare Bauteilgenauigkeit bei der Herstellung von geradverzahnten Zahnrädern im „Samanta“-Verfahren. Jedoch wurden keine grundlegenden Erkenntnisse auf die resultierenden Bauteil- und Prozesseigenschaften abgeleitet.

2.2 Ansätze zur vorteilhaften Beeinflussung des Prozessergebnisses

Das Kaltfließpressen ist eine materialeffiziente, ressourcenschonende und wirtschaftliche Produktionsmethode zur Fertigung hochbeanspruchbarer Bauteile [115]. Zur Anwendung in der Zahnradherstellung gelten neben der erzielbaren Verzahnungsgenauigkeit [95] die erreichbaren Werkzeugstandmengen als wesentliche Herausforderung [38]. Gegenüber konventionellen Quer- und Vorwärtsfließpressverfahren besitzt das „Samanta“-Verfahren, insbesondere durch Vermeidung eines Auswerfervorgangs der umgeformten Bauteile, Potential für die Etablierung in der Serienfertigung. Zur vorteilhaften Beeinflussung des Prozessergebnisses in Bezug auf die resultierenden Bauteil- und Prozesseigenschaften bieten Maßnahmen an der eigentlichen Basistechnologie eine geeignete Möglichkeit. Relevante werkzeug-, wirkfugen- und werkstückspezifische Methoden sind anhand des tribologischen Systems klassifizierbar.

2.2.1 Werkzeugtechnik

Kaltfließpresswerkzeuge für die Zahnradherstellung unterliegen ausgeprägten Belastungen während der Kaltumformung [106]. Teilweise betragen induzierte Spannungswerte über 3.000 MPa [116]. Speziell die filigranen Werkzeuginnenkonturen sowie eine hohe Werkstoffumlenkung während der Formgebung bewirken ungünstige Spannungskonzentrationen und forcieren - überwiegend ausgehend von der Werkzeugoberfläche [106] - die Ausbildung von Ermüdungsrisen [103]. Neben Ermüdungsbruch der eingesetzten Matrizen als (Haupt-) Versagensart [117], ist Verschleiß ein standmengenlimitierendes Versagenskriterium [10]. Aufgrund der kostenintensiven verzahnten Umformwerkzeuge ist eine hohe Standmenge entscheidend für einen wirtschaftlichen Einsatz des Umformprozesses [92]. Um die Werkzeugstandmenge beim Kaltfließpressen von Zahnradern zu erhöhen, ermöglicht eine anwendungsgerechte Werkzeugtechnik die Beanspruchung zu reduzieren und/oder die Beanspruchbarkeit zu erhöhen. Auch ist durch angepasste Werkzeugkonzepte der auftretende Materialfluss steuerbar, um das Formfüllungsverhalten und damit die erzielbare Bauteilgenauigkeit zu verbessern.

Armierungssystem

Fließpressmatrizen werden in Armierungssysteme mit Übermaß eingepresst, wodurch eine Druckvorspannung erzeugt wird [118]. Ziel ist die Überlagerung der auftretenden Prozessbeanspruchung mit der aufge-

brachten Druckvorspannung, um versagenskritische Zugbeanspruchungen in der Umformzone der Matrize zu vermeiden [119]. Das Beanspruchungskollektiv während der Umformung bewirkt zudem oftmals eine dynamische, elastische Aufweitung der Matrize, was Einfluss auf die Maßhaltigkeit der hergestellten Bauteile besitzt [117]. Das Armierungssystem hat in diesem Fall die Aufgabe, die Steifigkeit des Werkzeugsystems zu gewährleisten [19]. Zur Armierung von Fließpressmatrizen werden häufig ein oder zwei Ringe eingesetzt, wobei die Höhe der Vorspannung durch das Haftmaß bestimmt wird [118]. Die Trennfuge zwischen Matrizen und Armierung ist zylindrisch oder kegelig ausführbar [120]. Zylindrische Armierungsringe sind kostengünstiger [19], wohingegen kegelförmige Ausführungen Vorteile in Bezug auf die Montage und Wiederverwendbarkeit besitzen [40]. Genügen konventionelle Armierungssysteme nicht den auftretenden Beanspruchungen, sind bandgewickelte Armierungen anwendbar [121], um erhöhte Vorspannungszustände zu realisieren [122]. Maximal zulässige (Vor-)Spannungswerte sind hierbei vom verwendeten Matrizen- und Armierungswerkstoff abhängig [121]. Jütte [123] entwickelte ein Werkzeugsystem, das eine prozessangepasste Vorspannung erlaubt, um auftretende Verzahnungsabweichungen zu korrigieren und die Teilequalität zu verbessern. Zur Kompensation der elastischen Matrizenaufweitung während der Umformung wurde von Baumgarten [79] ebenfalls ein Werkzeugkonzept zur Beeinflussung des Vorspannungszustand untersucht.

Werkzeuglayout

Das formgebende Umformwerkzeug hat die Aufgabe, die geforderte Form- und Eigenschaftsqualität der hergestellten Bauteile durch Steuerung des Materialflusses sicher zu stellen [88]. Auch sind die auftretenden Belastungen aus dem Umformvorgang zu ertragen, um wirtschaftliche Bauteilstückzahlen fertigen zu können [88]. Für einen anwendungsge rechten Werkzeugeinsatz bildet das Werkzeuglayout einen zentralen Ansatzpunkt, da es einen entscheidenden Einfluss auf das auftretende Beanspruchungsniveau besitzt [124]. Eine Reduzierung von Spannungskonzentrationen und -zuständen in kritischen Werkzeugbereichen bewirkt eine unmittelbare Steigerung der erreichbaren Standmenge und reduziert das Risiko eines vorzeitigen Werkzeugausfalls [125].

Matrizenschulterwinkel

Die auf die exponierte Fließpressschulter wirkenden Prozesskräfte initiieren ein Biegemoment, welches versagenskritische Zugspannungen in diesem Werkzeugbereich bedingt [19]. Insbesondere im Übergangsbereich

zwischen Schulter und Matrizenwandung kommt es zu ausgeprägten Spannungsspitzen [39], die oftmals Ausgangspunkt für eine Rissinitiierung sind [88]. Die Größe des Schulterwinkels hat entscheidenden Einfluss auf das auftretende Beanspruchungsniveau und das Formfüllungsverhalten während des Kaltfließpressens von Zahnrädern [126]. Kleine Schulterwinkel besitzen einen vorteilhaften Einfluss auf die resultierende Beanspruchung [126], wohingegen der durch größere Winkel hervorgerufene Materialfluss eine verbesserte Formfüllung bewirkt [64].

Innenkontur Matrize

Im Bereich der Innenkontur von Fließpressmatrizen beinhaltet eine beanspruchungsangepasste Gestaltung die günstige Wahl der Werkzeugradialen und der Länge von Gleitwegen [19]. Anpassungen der Werkzeuggestalt sind möglich, wenn die Endgeometrie des umgeformten Bauteils weiterhin innerhalb der zulässigen Toleranzen liegt [69]. Zur Vermeidung von Spannungsspitzen sind scharfkantige Konturübergänge zu vermeiden [19]. Durch die Modifikation der formgebenden Werkzeuggeometrie in der Umformzone wird der hervorgerufene Materialfluss beeinflusst [88], wodurch eine gesteigerte Bauteilgenauigkeit erzielbar ist [126]. Koll [21] untersuchte eine geometrische Werkzeuganpassung im Verzahnungsbereich bei der Fertigung schrägverzahnter Zahnräder. Neben einer verbesserten Maßhaltigkeit wurde die auftretende Werkzeugbeanspruchung reduziert.

Matrizenquerteilung

In der Umformzone der Matrize treten insbesondere beim Kaltfließpressen von Zahnrädern im Schultereinlaufbereich Spannungskonzentrationen in Verbindung mit axialen Zugbeanspruchungen auf [19]. Für konventionelle Vorwärtsfließpressmatrizen wird in der Industrie diesen kritischen Spannungszuständen häufig mit einer Matrizenquerteilung begegnet [127]. Koll [21] und Lennartz [53] bestätigen eine grundsätzliche Notwendigkeit dieser Werkzeuganpassung auch für Verzahnungsmatrizen. Neben einer Reduzierung der Beanspruchung wird die Zugänglichkeit im Zuge des Werkzeugherstellungsprozesses erleichtert.

Herstellungsprozess

Eine hohe Werkzeugleistungsfähigkeit setzt eine geeignete Werkstoffwahl voraus [127]. Fließpressmatrizen sind höchstbeanspruchte Komponenten, wodurch an die ausgewählten Werkzeugwerkstoffe besondere Anforderungen an Druck-/Verschleißfestigkeit und Härte bei gleichzeitig ausreichender Zähigkeit gestellt werden [48]. Ein solches Anforderungsprofil

erfüllen Schnellarbeitsstähle und kommen daher meist für anspruchsvolle Umformoperationen – wie die Verzahnungsherstellung – zur Anwendung [40]. Im Zuge der Werkzeugherstellung werden die Oberflächeneigenschaften des Umformwerkzeugs bestimmt, womit das Werkzeugeinsatzverhalten wesentlich beeinflusst wird [10]. Zudem hat die Herstellungsgenauigkeit verzahnter Werkzeuge direkte Auswirkungen auf die erzielbare Maßgenauigkeit der umgeformten Bauteile [128]. Aus diesem Grund werden Matrizen zur Verzahnungsherstellung in der Regel zwei Toleranzklassen präziser als die geforderte Produktqualität hergestellt [32]. Gerade für kleine Zahnradmoduln ist der Herstellungsprozess aufgrund der geringen Bauteildimension in Kombination mit hohen Anforderungen an die Maßhaltigkeit anspruchsvoll [16].

Geometrieerzeugung

Die Herstellung von verzahnten Kaltfließpresswerkzeugen erfolgt in der Regel durch eine funkenerosive Bearbeitung [53], womit eine hohe Maßhaltigkeit erzielt wird [129]. Bei geradzahnten Matrizen findet meist das Drahterodieren Anwendung [53]. Dieses Verfahren ist auf gerade Schnitte limitiert, weshalb für Schrägverzahnungen das Senkerodieren eingesetzt wird [53]. Der Materialabtrag erfolgt durch elektrische Entladevorgänge zwischen dem als Elektrode fungierenden Werkzeug und dem Werkzeugrohling in einer dielektrischen Flüssigkeit [130]. Auftretender Verschleiß an der Elektrode ist hierbei zu berücksichtigen, um hohe Maßgenauigkeiten zu erzielen [131]. Aufgrund der verfahrensbedingten Wärmeeinbringung während des Erodierprozesses entsteht eine thermisch beeinflusste Randzone [132], die sogenannte „weiße Schicht“ [133]. Charakteristisch für diese Zone sind unter anderem Mikrorisse [134] und oberflächennahe Zugeigenspannungen [135], welche die dynamische Werkzeugbeanspruchbarkeit reduzieren [53].

Nachbearbeitung

Zur Entfernung der wärmebeeinflussten Zone ist eine dem Erodierprozess nachgeschaltete Bearbeitung notwendig [53]. Für Verzahnungsmatrizen wird die Nachbearbeitung der Oberflächen aufgrund einer begrenzten Zugänglichkeit erschwert [53]. Eine (Quer-)Teilung des Matrizenkerns besitzt hierbei einen vorteilhaften Einfluss [53]. Als Nachbearbeitungsverfahren wird meist das Extruderhonen eingesetzt [53], bei dem ein abrasives Medium, welches in einer hochviskosen Paste gelöst ist, wiederholt mit hohem Druck über die Werkzeugoberfläche geleitet wird [136]. Vorteilhaft ist, dass Bearbeitungsriefen in Richtung des Materialflusses eingebracht werden, wodurch Fließbehinderungen während der Umfor-

mung minimiert werden [137]. Die Strömung des Mediums ist jedoch nur begrenzt steuerbar, weshalb der Materialabtrag teilweise unkontrolliert erfolgt [137]. Auch werden formgebende Werkzeugkonturen oftmals vom umströmenden Medium nur bedingt erreicht [137]. Wenn die Zugänglichkeit vorhanden ist, ist für kritische Werkzeugbereiche ein anschließender Einsatz des manuellen Polierens aufgrund einer hohen Bearbeitungsflexibilität möglich [137]. Das manuelle Polieren bietet das Potential, die Ermüdungsfestigkeit zu steigern [138]. Zudem sind Strahlprozesse in die Prozesskette integrierbar, um die Werkzeugbeanspruchbarkeit, aufgrund der Einbringung von Druckeigenstressungen in die Oberfläche, zu erhöhen [139]. Die erzeugte Oberflächenstruktur besitzt zudem Einfluss auf die auftretenden Reibbedingungen während der Umformung [140], was im Fokus der Untersuchungen von Matsumoto et. al. [141] sowie Abe et. al. [142] stand.

Beschichtungen

Zur Steigerung der Verschleißfestigkeit ist der Einsatz von Beschichtungen für Fließpressmatrizen eine bewährte Methode [143], um Standmengenwüchse im Serieneinsatz zu erzielen [144]. Häufig werden PVD-Beschichtungen aufgrund niedriger Beschichtungstemperaturen eingesetzt, da die Gefahr von Verzug und Härteverlust gering ist [145]. Die Applikation von PVD-Schichtsystemen ist jedoch nur möglich, solange die Tiefe in etwa dem Matrizen(innen)durchmesser entspricht, was eine entsprechende Zugänglichkeit bedingt [146]. Untersuchungen zur Werkzeugbeschichtung wurden unter anderem von König et. al. [147] und Podgornik et. al. [148] unternommen.

2.2.2 Wirkfuge

In der Kaltmassivumformung tritt in der Wirkfuge zwischen Werkstück- und Werkzeugoberfläche Reibung auf, wobei im Speziellen Mischreibungszustände vorliegen [149]. Reibung wird beschrieben als die Ausbildung einer Widerstandskraft durch die Einleitung und Aufrechterhaltung einer Relativbewegung zweier sich berührender Körper [150]. Ein Anstieg der Reibbedingungen bedingt oftmals einen erhöhten Kraft- und Energiebedarf [151].

Schmiersysteme haben die Aufgabe, eine zuverlässige Trennung der Reibpartner zu erzielen [152]. Beim Fließpressen von Zahnrädern wird die auf dem Rohteil befindliche Schmierfilmdicke infolge der starken Oberflächenvergrößerung im Zahnbereich verringert [53]. Zusätzlich wird die Restschicht an Schmierstoff im Verzahnungseinlauf wegen der hohen

Werkstoffumlenkung noch zusätzlich abgestreift, sodass an den Zahnflanken teilweise nur noch eine geringe Menge an Schmierstoff vorhanden ist [53]. In der Folge tritt oftmals eine Grenzreibung oder im Extremfall eine Festkörperreibung und somit direkter metallischer Kontakt auf [149]. Die Konsequenz ist häufig erhöhter adhäsiver Verschleiß [153], wobei abgelöste Werkstückteilchen den Aufbau von Kaltverschweißungen auf den Werkzeugoberflächen begünstigen [53]. Im Verlauf des Umformprozesses werden diese hochverfestigten Werkstoffpartikel abgetrennt und reiben an der Werkzeugoberfläche, wodurch abrasiver Verschleiß verursacht wird [53]. Verschleiß hat direkte Auswirkung auf die Qualität der Werkzeugoberfläche [154] und limitiert oftmals die erreichbare Werkzeugstandmenge [155].

Aufgrund der ausgeprägten mechanischen Beanspruchung des Schmier-systems während der Umformung werden hohe Anforderungen an die Bindungsfestigkeit zwischen Schmierstoff und Rohlingsoberfläche gestellt [156]. Standardmäßig kommen beim Kaltfließpressen sogenannte Konversionsschichten zur Anwendung [157], welche sich aus einer Kombination einer Zinkphosphatschicht als Trägermedium mit Seife als Schmierstoff zusammensetzen [158]. Dieses System überzeugt aufgrund einer hohen Adhäsionsfestigkeit durch eine zuverlässige Trennwirkung von Werkzeug und Werkstück [159]. Für das Verzahnungspressen untersuchte König [114] den Einfluss verschiedener Schmiersysteme auf die resultierenden Prozesskräfte und Werkzeugbeanspruchung. Auswirkungen auf die Bauteileigenschaften standen nicht im Fokus. Auch liegen Hinweise vor, dass eine geringe Reibung eine Verbesserung der Formfüllung bewirkt und die Werkzeugbeanspruchung reduziert [53].

2.2.3 Werkstück

Beim Kaltfließpressen besitzt der eingesetzte Rohling direkten Einfluss auf die erzielbare Bauteilqualität und die erreichbare Werkzeugstandmenge und folglich die Wirtschaftlichkeit des Umformprozesses [39]. Maß-, Form- und Lageabweichung sind daher am Rohteil möglichst gering zu halten [160]. Schwankungen in den Eigenschaften des Werkstoffs resultieren in einer Verteilung des Fließkurvenniveaus und bedingen eine entsprechende Streuung des Werkzeugeinsatzverhaltens [161]. Vorteilhafte Werkstoffeigenschaften bieten Stähle mit einem homogenen Gefüge, einer geringen Anfangsfließspannung und Verfestigungsneigung sowie einem hohem Umformvermögen [19]. Die Umformbarkeit ist von Art und Gehalt der verwendeten Legierungselemente abhängig, wobei insbesondere der Kohlenstoffgehalt maßgeblich ist [3]. Für die Herstellung von

Zahnradern kommen überwiegend Einsatzstähle zur Anwendung [162]. Die entsprechenden Fließpressrohlinge werden meist aus Stangenmaterial durch Scheren oder Sägen gefertigt [3]. Zur Steigerung der Umformbarkeit werden diese oftmals vor und/oder zwischen den einzelnen Fertigungsstufen wärmebehandelt [19]. Im Vorfeld des Umformprozesses wird häufig das Glühen auf kugeligem Zementit (GKZ) eingesetzt [19]. Durch die Umwandlung von lamellaren in kugeligem Zementit wird das Formänderungsvermögen erhöht und die Festigkeit reduziert, da der Materialfluss durch die weiche ferritische Phase begünstigt wird [19]. Streuungen in den Fertigungstoleranzen der Rohteile sowie Chargenschwankungen der Stähle treten grundsätzlich in der industriellen Praxis auf und sind nur mit enorm hohem Aufwand reduzierbar und gelten daher als elementarer Faktor in der Kaltmassivumformung [161].

2.3 Zusammenfassende Bewertung

Das Kaltfließpressen von Zahnradern besitzt ökologische, ökonomische und technologische Vorteile im Vergleich zu konventionellen Produktionsmethoden, wie der spanenden Herstellung. Besonders hervorzuheben sind kürzere Fertigungstaktzeiten zur Realisierung hoher Stückzahlen bei gleichzeitig verbesserter Materialeffizienz und erhöhter Beanspruchbarkeit der Zahnradern im Einsatz.

Zur standardmäßigen Etablierung dieser Verfahren kommt der Steigerung der erzielbaren Verzahnungsgenauigkeit und der erreichbaren Werkzeugstandmenge eine bedeutende Rolle zu. Innerhalb klassischer Quer- und Vorwärtsfließpressverfahren stellt zudem der Auswerfervorgang der umgeformten Zahnradern aus der formgebenden Matrize eine wesentliche Herausforderung dar. Das Auswerfen bedingt einen weiteren Prozessschritt und für verzahnte Bauteile hohe Prozesskräfte. Gerade das Auspressen von Schrägverzahnungen führt zu einem zusätzlichen Kraftanstieg aufgrund einer erneuten Materialumformung. Neben dem Risiko einer Werkzeugbeschädigung wird oftmals die resultierende Maßhaltigkeit der Zahnradern negativ beeinflusst.

Eine Verfahrensvariante des Vorwärtsfließpressens zur Herstellung von gerad- und schrägverzahnten Zahnradern ist das sogenannte „Samanta“-Verfahren. Bei diesem Umformprozess werden mehrere Rohlinge sequentiell durch die formgebende Matrize gepresst, indem die Umformung eines Rohlings unterbrochen und ein weiterer in das Werkzeugsystem eingelegt wird. Durch diese Prozessführung ist ein zusätzlicher Auswerfervorgang der umgeformten Bauteile vermeidbar. Aus diesem Grund ist

dieses Verfahren von besonderem Interesse für einen Einsatz in industriellen Serienanwendungen.

Das Potential zur Zahnradherstellung wurde unter anderem von Koll [21] und König et al. [114] nachgewiesen. Grund für die Schwierigkeiten bei der Anwendung des „Samanta“-Verfahrens in der Industrie ist das bislang geringe Prozessverständnis, da der Prozess bis zum heutigen Zeitpunkt noch nicht grundlegend und systematisch erforscht wurde. Derzeit ist nicht bekannt, welche konkreten Zahnradgeometrien kaltfließpresstechnisch realisierbar sind. Ferner sind keine systematischen Untersuchungen hinsichtlich funktionaler Zusammenhänge zwischen Zahnradparametern - wie Modul und Schrägungswinkel - und deren Einfluss auf das Prozessergebnis vorhanden. Auch das Wissen zur Herstellung von Gerad- und Schrägverzahnungen hinsichtlich Gemeinsamkeiten und Unterschieden wären für den Anwender hilfreich.

Zur Steigerung der erreichbaren Bauteilgenauigkeit und der Reduzierung der auftretenden Werkzeugbeanspruchung sind bis heute Hinweise nur in begrenztem Umfang vorhanden, um diesen Aspekten effizient und zielgerichtet zu begegnen. Potentielle Ansätze des tribologischen Systems zur Werkzeugtechnik und der Wirkfuge sind noch nicht hinreichend grundlegend erforscht. Auch ganzheitliche Erkenntnisse, inwiefern vorteilhafte Methoden innerhalb unterschiedlicher Zahnradgeometrien insbesondere zwischen Gerad- und Schrägverzahnungen übertragbar sind, liegen nur wenige vor.

Im Speziellen sind Wissenslücken zur Werkzeuggestaltung von gerad- und schrägverzahnten Matrizen für das Kaltfließpressen im „Samanta“-Verfahren vorhanden. Insbesondere Hinweise für eine geometrische Anpassung des Verzahnungseinlaufs wären entscheidend. Zudem ist das vorhandene Wissen über den Einfluss der auftretenden Reibbedingungen auf die Bauteil- und Prozesseigenschaften bislang zu gering, um einen nutzbaren Effekt zur positiven Beeinflussung des Prozessergebnisses ableiten zu können. Andernfalls wäre es möglich, entsprechende Anforderungen hinsichtlich vorteilhafter Reibbedingungen an das einzusetzende Schmiersystem zu formulieren. Erkenntnisse über diese Fragestellungen schaffen eine Grundlage, um das „Samanta“-Verfahren im Zuge der Auswahl eines Fertigungsverfahrens zur Herstellung von Zahnradern einzubeziehen und letztlich einsetzen zu können.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Das Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern im „Samanta“-Verfahren steht im Fokus der Arbeit. Die erzielbare Verzahnungsgenauigkeit sowie unzureichende Werkzeugstandmengen gelten als wesentliche Herausforderungen bei der Etablierung dieses Prozesses.

Diese Arbeit knüpft an den genannten Punkten an, um die Grundlage für die wirtschaftliche Herstellung hochbeanspruchbarer, präziser Zahnräder zu schaffen. Die Ziele umfassen die Erarbeitung eines tiefergehenden Prozessverständnisses zwischen Zahnradparametern und Prozessgrößen sowie die Erforschung praxisrelevanter Methoden zur Verbesserung des Prozessergebnisses. Basierend hierauf erfolgt die Ableitung von Empfehlungen zur Prozessauslegung. Zur Zielerreichung liegt dieser Arbeit die in Bild 1 gezeigte methodische Vorgehensweise zugrunde.

Im Rahmen der Arbeit werden verschiedene Zahnräder aus gängigen Stahlwerkstoffen kaltfließpresstechnisch im „Samanta“-Verfahren hergestellt. Als Referenz dient eine gerad- und schrägverzahnte Zahnradgeometrie. Anhand von empirischem Praxis- und Literaturwissen werden die (Referenz-)Zahnradprozesse unter anderem hinsichtlich der Prozessführungsstrategie, der Werkzeugtechnik und des Schmiersystems ausgelegt und aufgebaut. Auf Grundlage der charakterisierten resultierenden Bauteil- und Prozesseigenschaften werden Erkenntnisse in Bezug auf Gemeinsamkeiten und Unterschiede bei der Herstellung von Gerad- und Schrägverzahnungen erforscht.

Neben rein experimentellen Versuchen werden für beide Prozesse FE-Modelle aufgebaut, um die Zahnradherstellung simulativ abbilden und untersuchen zu können. Relevante Inputdaten werden hierfür in Laborversuchen ermittelt. Um die Simulationsmodelle zu validieren und diese so für den Einsatz in numerischen Untersuchungen zu qualifizieren, erfolgt ein Abgleich mit den experimentellen Ergebnissen.

Zur Erarbeitung eines tiefergehenden Prozessverständnisses werden anhand der validierten FE-Modelle der Referenzprozesse in numerischen Analysen funktionale Zusammenhänge zwischen den Zahnradparametern und deren Einfluss auf die Bauteil- und Prozesseigenschaften abgeleitet. Diese Erkenntnisse werden durch Rückführung auf Modellvorstellungen sowie physikalische Effekte plausibilisiert. Hierfür wird ausgehend von den gerad- und schrägverzahnten Referenzzahnradgeometrien der Einfluss der Zähnezahl sowie weiterer Zahnradtypen untersucht, wobei der

Modul und/oder Schrägungswinkel variiert wird. Auch werden ausgewählte Zahnräder des festgelegten Parameterraums, analog zur Prozessauslegung der Referenzprozesse, experimentell hergestellt, um die Machbarkeit prüfen und die numerischen Erkenntnisse verifizieren zu können.



Bild 1: Methodische Vorgehensweise

Um den bauteil- und prozessseitigen Herausforderungen - wie die erzielbare Verzahnungsgenauigkeit und auftretende Werkzeugbeanspruchung - zu begegnen, werden anhand der Referenzprozesse werkzeugseitige und tribologische Stellhebel simulativ erforscht und Auslegungshinweise abgeleitet. Auf Basis der erarbeiteten Empfehlungen werden die Prozesse der experimentell hergestellten Zahnräder angepasst und Bauteile abgepresst. Ziel ist die Quantifizierung einer möglichen Verbesserung des

Prozessergebnisses und der Vergleich der Wirksamkeit innerhalb unterschiedlicher Zahnradgeometrien, insbesondere zwischen Gerad- und Schrägverzahnungen.

Abschließend erfolgt eine systematische Zusammenfassung und Bewertung der erforschten Erkenntnisse. Im Fokus stehen die Schaffung eines grundlegenden Prozessverständnisses und die Ableitung von praxisrelevanten Empfehlungen zur Prozessauslegung für die Zahnradherstellung im „Samanta“-Verfahren.

4 Angewendete Werkstoffe, Schmier-systeme, Anlagen und Verfahren

Die untersuchten werkstück- und werkzeugseitigen Versuchswerkstoffe innerhalb dieser Arbeit werden nachfolgend beschrieben. Zudem wird das in den Umformversuchen verwendete Schmierstoffsystem vorgestellt und auf das in einem Laborversuch ermittelte spezifische tribologische Einsatzverhalten eingegangen. Auch werden die zur Zahnradherstellung eingesetzten Umformmaschinen erläutert. Abschließend stehen Methoden und Verfahren zur Charakterisierung der resultierenden Eigenschaften der kaltfließgepressten Zahnräder im Fokus.

4.1 Werkstoffe

Beim Kaltfließpressen sind die verwendeten Werkstoffe für die umzuformenden Bauteile und die eingesetzten Werkzeuge prozessentscheidende Faktoren [87]. Für die virtuelle Abbildung der Zahnradprozesse sind neben dem plastischen Materialverhalten des Zahnradwerkstoffs die elastischen Kennwerte der Werkzeugstähle entscheidend.

4.1.1 Zahnräder

Der Bauteilwerkstoff hat unter anderem entscheidenden Einfluss auf das Formfüllungsverhalten [163], das Beanspruchungsniveau der Werkzeugsysteme [39] und das Einsatzverhalten während des Betriebs [164]. Um eine industrielle Anwendungsrelevanz und eine werkstoffliche Übertragbarkeit der Forschungsergebnisse zu erzielen, wurde als Zahnradwerkstoff neben der Stahlsorte 16MnCr5 (1.7131) die Qualität C15C (1.0234) im GKZ-geglühten Zustand eingesetzt. Tabelle 1 stellt die chemische Zusammensetzung beider Stähle gegenüber.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung 16MnCr5 (1.7131) [165] und C15C (1.0234) [166]

	C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]
16MnCr5	0,14 - 0,19	≤ 0,40	1,00 - 1,30	≤ 0,025	≤ 0,035	0,80 - 1,10
C15C	0,13 - 0,17	≤ 0,10	0,35 - 0,60	≤ 0,025	≤ 0,025	-

16MnCr5 besitzt im Vergleich zu C15C mehr Kohlenstoff (C) und einen vor allem höheren Anteil an Silicium (Si), Mangan (Mn) und Chrom (Cr). Dieser Unterschied ist maßgeblich für das resultierende mechanische Eigenschaftsprofil hinsichtlich des Festigkeitsniveaus [19]. Das spezifische plastische Materialverhalten wurde durch Druckfließkurven abgebildet, welche im Stauchversuch nach DIN 50106 [167] ermittelt wurden (Bild 2).

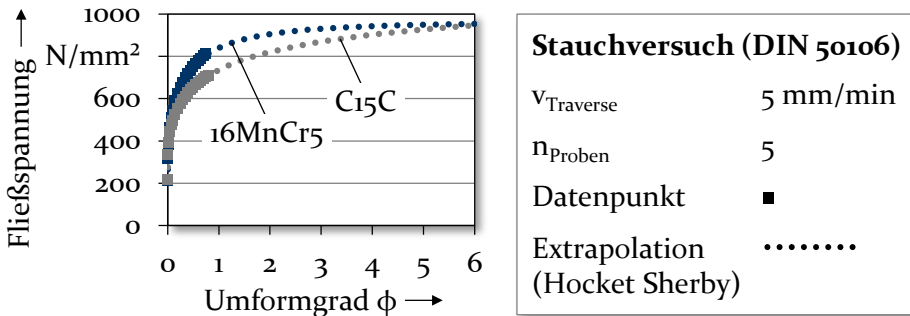


Bild 2: Fließkurven 16MnCr5 und C15C

Die Stauchversuche wurden bis zu einem Umformgrad von $\phi = 0,8$ ausgewertet und für höhere Umformgrade nach dem gängigen Ansatz von Hockett Sherby [168] extrapoliert. Der Einsatzstahl 16MnCr5 besitzt einen Fließbeginn bei etwa 210 MPa. Infolge der Kaltverfestigung steigt die Fließspannung bis zu einem Wert von circa 810 MPa für einen Umformgrad von $\phi = 0,8$ an. Im Vergleich beginnt die Plastifizierung der Stahlsorte C15C bei rund 215 MPa und erreicht 709 MPa für einen Umformgrad von $\phi = 0,8$. Das spezifische Festigkeitsniveau von C15C gegenüber 16MnCr5 ist folglich geringer.

4.1.2 Werkzeuge

Werkzeuge der Kaltmassivumformung unterliegen ausgeprägten Beanspruchungen während des Einsatzes, wodurch entsprechende Anforderungen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit für Werkzeugwerkstoffe resultieren [169]. Werkzeugstähle werden diesen Forderungen gerecht und kommen daher meist in der industriellen Praxis zum Einsatz [170]. Für die verwendeten Werkzeugsysteme wurden für die relevanten Aktivteile matrizenseitig die Stahlsorte ASP2012 (1.3397) und für die Armierung X37CrMoV5-1 (1.2343) gewählt. Die Richtwerte der spezifischen chemischen Zusammensetzung sind in Tabelle 2 gegenübergestellt.

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung ASP2012 (1.3397) [171] und X37CrMoV5-1 (1.2343) [172]

	Fe [%]	C [%]	Si [%]	Mn [%]	Cr [%]	Mo [%]	W [%]	V [%]
1.3397	89,10	0,60	1,00	0,30	4,00	2,00	2,10	1,50
1.2343	91,42	0,38	1,10	0,40	5,00	1,30	-	0,40

ASP2012 (1.3397) besitzt einen höheren Anteil an Kohlenstoff (C), Molybdän (Mo) und Vanadium (V). Hingegen weist X37CrMoV5-1 (1.2343) höhere Werte für Silicium (Si), Mangan (Mn) und Chrom (Cr) auf. Wesentlicher Unterschied ist, dass für ASP2012 (1.3397) Wolfram (W) hinzulegiert ist. Zur simulativen Untersuchung der auftretenden Werkzeugbeanspruchung während des Kaltfließpressens werden die elastischen Kennwerte beider Werkzeugstähle im FE-Programm hinterlegt. Das mechanische Eigenschaftsprofil für beide Stahlsorten fasst Tabelle 3 zusammen.

Tabelle 3: Mechanisches Eigenschaftsprofil ASP2012 (1.3397) [171] und X37CrMoV5-1 (1.2343) [172]

	E-Modul [kN/mm ²]	Dichte [g/cm ³]	Poissonzahl [-]	Härte [HRC]
1.3397	220,0	7,8	0,3	57,0 ± 2,0
1.2343	215,0	7,8	0,3	48,0 ± 2,0

Der Matrizenwerkstoff ASP2012 (1.3397) hat einen E-Modul von 220,0 kN/mm² gegenüber 215,0 kN/mm² der Stahlsorte X37CrMoV5-1 (1.2343) für die Armierung. Die Dichte und Poissonzahl ist für beide Stahlgüten gleich. Die Einsatzhärte der Matrize (1.3397) beträgt 57,0 ± 2,0 HRC und die der Armierung (1.2343) 48,0 ± 2,0 HRC.

4.2 Anlagen

Für das Kaltfließpressen der gerad- und schrägverzahnten Zahnräder wurden eine Universalprüfmaschine und eine hydraulische Presse eingesetzt. Die Auswahl ist basierend auf den verfügbaren anlagenseitigen

maximalen Prozesskräften. Die Prozessführungsstrategie erfolgt während der Umformversuche weggeregelt.

Die Universalprüfmaschine Schenk-Trebel RM400 der Firma Schenk Trebel Corporation basiert auf einem elektromechanischen Funktionsprinzip. Die Presse verfügt über einen externen Messrechner, welcher mit der Prüfsoftware Zwick testXpert II ausgestattet ist. Die maximal verfügbare Prozesskraft beträgt 400kN, bei einem Maximalhub von 1600 mm und einer Stempelgeschwindigkeit von bis zu 300 mm/min. Die Maschine erreicht eine Positioniergenauigkeit von +/- 0,01 mm [173]. Die hydraulische Presse vom Typ TZP 400/3 der Firma Lasco Umformtechnik GmbH verfügt über ein dreifachwirkendes hydraulisches Antriebssystem. Auftretende Prozesskräfte werden direkt aus dem Steuerungssystem der Umformpresse durch einen externen Messrechner erfasst. Im Betrieb steht eine maximale Prozesskraft von 4.000 kN, ein maximaler Hub von 500 mm und eine Stempelgeschwindigkeit von bis zu 250 mm/s zur Verfügung.

4.3 Schmierstoffsystem

Die tribologischen Bedingungen während des Kaltfließpressens haben wesentlichen Einfluss auf die resultierende Bauteilqualität, den auftretenden Verschleiß der Werkzeuge [174] und die erforderliche Prozesskraft und -energie [175]. Im Bereich der Kaltmassivumformung stellt eine Kombination aus Zinkphosphatschicht mit dem Schmierstoff Seife - meist Natriumstearat als Hauptkomponente - den status quo für Tribosysteme dar [156]. Neben einer zuverlässigen Trennwirkung von Werkzeug und Werkstück wird eine niedrige Reibung erzielt [156]. Grund hierfür ist eine chemische Bindung des Seifenschmierstoffs an die Metalloberfläche des Rohlings, die während des Phosphatierungsprozesses erreicht wird [156]. Im Zuge der Prozessauslegung erfolgte im Rahmen dieser Arbeit ebenfalls der Rückgriff auf dieses bewährte tribologische System.

Um die tribologischen Bedingungen dieses Systems innerhalb der numerischen Modelle nachbilden zu können, wurde der entsprechende Reibfaktor in einem Laborversuch quantifiziert. Die Abbildung und Ermittlung der auftretenden Reibung während des Kaltfließpressens der Zahnräder erfolgte im Double Cup Extrusion (DCE) Test (Bild 3).

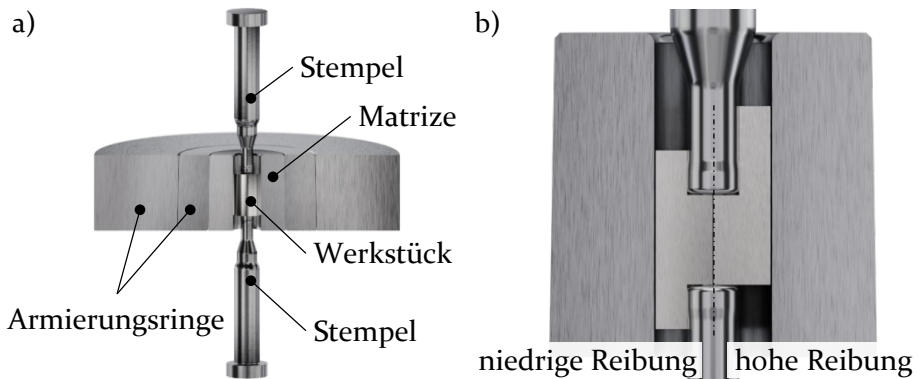


Bild 3: DCE-Test - a) Prozessaufbau und b) Prinzip

Dieser Laborversuch ist im Bereich der Kaltmassivumformung etabliert [176], da die Umformbedingungen insbesondere in Bezug auf Kontaktnormalspannungen und Oberflächenvergrößerung realitätsnah widerspiegelt werden [177]. Der Prozessaufbau (Bild 3a) besteht aus einem bewegten oberen und einem feststehenden unteren Stempel, einer radial vorgespannten Matrize und einer zylinderförmigen Probe, die in die Matrize zwischen den beiden Stempeln eingelegt wird. Die Werkstück- und Werkzeugwerkstoffe wurden analog zum Setup der Zahnradprozesse gewählt. Weiterhin entspricht die Herstellungsrouten der DCE-Matrize die der verzahnten Matrizen innerhalb der Zahnradprozesse. Die Umformversuche wurden auf der Universalprüfmaschine Schenk-Trebel RM400 durchgeführt.

Im DCE-Test wird zur Bestimmung der Reibung der Effekt genutzt, wonach die Napfhöhen von den vorherrschenden Reibbedingungen zwischen der Probenmantelfläche und der Matrizenwandung abhängen [178] (Bild 3b). Das resultierende Napfhöhenverhältnis aus oberer zu unterer Napfhöhe ist somit ein geeigneter Indikator zur Bestimmung der Reibung [178].

Eine direkte Bestimmung des vorliegenden Reibfaktors auf experimenteller Basis ist nicht möglich. Vor diesem Hintergrund wird das Prinzip der numerischen Identifikation mit Hilfe der FE-Software FORGE NxT genutzt. Die Quantifizierung des Reibfaktors erfolgt durch einen Vergleich der experimentell und numerisch gemessenen Napfhöhenverhältnisse. Um die Aussagekraft des abgeleiteten Reibungsfaktors zu gewährleisten, wurde das FE-Modell exemplarisch anhand einer Probe innerhalb der Versuchsreihe hinsichtlich der Bauteilgeometrie und der Umformkraftkurve validiert (Bild 4) [179].

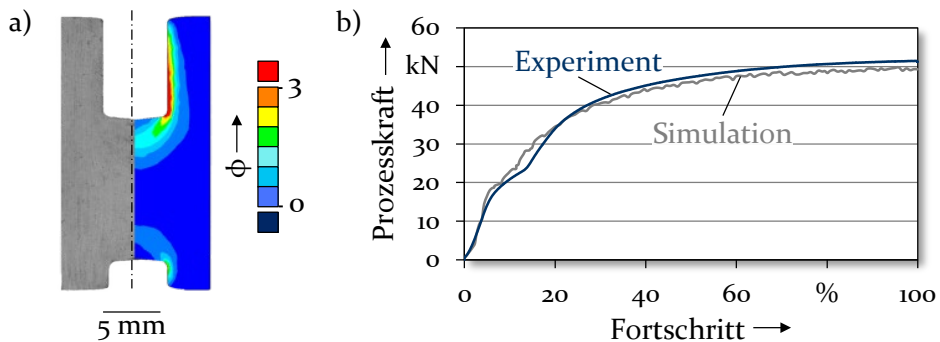


Bild 4: DCE-Test - Bauteil- (a) und prozessseitige (b) Validierung des FE-Modells

Die experimentelle und numerische Bauteilgeometrie weisen eine gute Übereinstimmung auf (Bild 4a). Weiterhin bestätigen der Vergleich der Umformkraftkurven und deren Maxima eine hohe Qualität des FE-Modells (Bild 4b).

Basierend hierauf ist es zulässig, den berechneten Reibfaktor zur Abbildung der tribologischen Bedingungen zu nutzen. Für das vorliegende Setup resultiert ein Napfhöhenverhältnis von $3,34 \pm 0,05$, womit unter Nutzung des entwickelten FE-Modells ein Reibfaktor von $0,09$ folgt. Dieser dient als Inputwert für die Prozesssimulation der Zahnräder zur Abbildung der tribologischen Bedingungen.

4.4 Messverfahren zur Ermittlung der Bauteileigenschaften

Zur Schaffung eines grundlegenden Verständnisses für die Herstellung von Zahnradern im „Samanta“-Verfahren und die Erforschung von Methoden zur Verbesserung des Prozessergebnisses bildet die Ermittlung der resultierenden Bauteileigenschaften einen zentralen Bestandteil. So wurden die kaltfließgepressten Zahnräder hinsichtlich ihrer geometrischen und mechanischen Eigenschaften charakterisiert.

4.4.1 Genauigkeit

Die Ermittlung der Bauteilgenauigkeit erfolgte im Hinblick auf die Makrogeometrie, um unter Berücksichtigung einer möglichen stirnseitigen Nachbearbeitung die letztlich nutzbare Verzahnungshöhe zu analysieren. Zudem wurde die Verzahnungsgenauigkeit nach industriellen Standards ermittelt, um das Einsatzpotential der hergestellten Zahnräder bewerten zu können.

Makrogeometrie

Die Bauteilgeometrie der experimentell hergestellten Zahnräder, welche Serienbedingungen widerspiegeln, wurde digitalisiert. Ziel dieser Bauteildigitalisierung ist die Bewertung der geometrischen Prognosequalität der eingesetzten FE-Modelle. Zudem werden die nutzbaren Höhen h_N der hergestellten Zahnräder bestimmt, welche den prozentualen nutzbaren Anteil zur Soll-Zahnradbreite b wiedergeben.

Mit dem Messsystem ATOS der Firma GOM GmbH werden die Zahnräder vollflächig durch Streifenlichtprojektion mittels einer optischen 3D-Koordinatenmessung unter Nutzung der Systemsoftware ATOS Professional erfasst. Innerhalb der Auswertesoftware GOM Inspect 2016 erfolgt ein Geometrievergleich der makroskopisch aufgenommenen 3D-Netzdaten mit den CAD-Daten der numerisch umgeformten Zahnräder zur Validierung der FE-Modelle sowie mit den Sollzahnradern zur Bestimmung der nutzbaren Höhe h_N . Die geometrische Analyse gibt letztlich Aufschluss über die auftretenden Abweichungen innerhalb der Geometrien.

Für durch das „Samanta“-Prinzip hergestellte Zahnräder ist eine spanende Nachbearbeitung der Stirnseiten erforderlich, wodurch die nutzbare Höhe begrenzt wird. Diese Bauteilbereiche weisen in Anlehnung an normative Vorgaben keine auswertbare und funktionsfähige Formfüllung der Zahnkontur auf [180]. Der Einlaufbereich kennzeichnet die Grenze im unteren Bauteilbereich. Die Grenze für den nutzbaren Anteil im oberen Bereich des Zahnrads wird durch die tiefste Stelle im Bauteilzentrum vorgegeben. Dies stellt die minimale Grenze im oberen Bereich des Zahnrads dar. Im Fall einer nachgeschalteten Bohrung steigt der nutzbare Anteil, da die tiefste Stelle in Abhängigkeit vom Durchmesser im Bauteilzentrum vorteilhaft verschoben wird.

Verzahnung

Um die Verzahnungsgenauigkeit zu ermitteln, wurden die Profil- und Flankenliniengesamtabweichung bestimmt, welche entscheidende Kenngrößen zur Bewertung der Verzahnungsqualität sind [181]. Die Einteilung der gemessenen Abweichungen in Toleranzklassen erfolgt anhand genormter Datenblätter [181].

Die Vermessung der Zahnräder wurde gemäß industriellen Standards durchgeführt. Hierzu wurde eine 3D-Messmaschine vom Typ Zeiss Prismo Vast Gold der Firma Carl Zeiss Industrielle Messtechnik GmbH genutzt, die mit der Auswertesoftware Zeiss Gear Pro 2017 ausgestattet ist. Innerhalb der Vermessungen wurde die Messstrategie entsprechend der

spezifischen Zahnradgröße, respektive Modul und/oder Schrägungswinkel, unter Berücksichtigung genormter Vorgaben angepasst. Die Auswertung erfolgte für drei Zahnräder, wobei jeweils vier 90° zueinander versetzte Zähne gemessen wurden.

4.4.2 Mechanische Eigenschaften

Neben geometrischen Aspekten kommt der Charakterisierung des mechanischen Eigenschaftsprofils der Zahnräder eine Schlüsselrolle zu. Infolge dessen sind Kenntnisse über das potentielle Beanspruchbarkeitsniveau und Versagensverhalten im Anwendungsfall ableitbar.

Faserverlauf

Für die Untersuchung gefügetechnischer Aspekte liefert die Lichtmikroskopie Aussagen über das Werkstoffgefüge. Dies ermöglicht die Erarbeitung eines Verständnisses über den auftretenden Materialfluss während der Umformung und die Ableitung von Rückschlüssen hinsichtlich beanspruchungsgerechter Gefügeeigenschaften.

Innerhalb der Analysen wurde ein System bestehend aus einem Lichtmikroskop vom Typ Aristomet der Firma Leica Microsystems GmbH und einer digitalen Fotokamera des Typs DP25 der Firma Olympus Europa SE & Co. KG, welches über die Auswertesoftware Stream Essentials verfügt, eingesetzt. In dieser Software werden die erzeugten Einzelaufnahmen zu einem Gesamtbild zusammengesetzt.

Härteprüfung

Zur quantitativen Analyse der umforminduzierten Kaltverfestigung infolge der Verzerrung des Werkstoffgefüges erfolgten Mikrohärtmessungen im Verzahnungsbereich der Bauteile. Verwendet wurde hierzu ein Messgerät vom Typ Fischerscope HM2000 der Firma Helmut Fischer GmbH & Co. KG ausgestattet mit der Prüfsoftware WIN-HCU. Das Messsystem besteht aus einem programmierbaren Messtisch zur Durchführung flächenhafter Härtemessungen und einem externen Messrechner.

Das Messprinzip erfolgt basierend der statistischen Härtemessung nach Vickers [182] unter Verwendung eines genormten Indentors. Während der Messung wird der Eindringkörper, eine quadratische Diamantpyramide mit einem Öffnungswinkel von 136° , in die metallographisch präparierten Schliffkörper mit vorgegebener Prüfkraft von 200 mN und einer Prüfdauer von 10 s eingedrückt. Der Punktabstand innerhalb der definierten Messfelder wurde entsprechend der zu untersuchenden Zahnradgröße

individuell angepasst. Für die verwendeten Stahlwerkstoffe berechnet sich die resultierende Vickershärte $HV_{0,02}$ [183] aus dem Quotienten der Prüfkraft, der Oberfläche des Eindrucks und einer spezifischen Konstanten. Zur qualitativen Analyse der Härteverteilung werden die aufgenommenen Daten der Messpunkte/-felder durch eine entsprechende Auswerterroutine visualisiert.

5 Prozesse zur Zahnradherstellung

Grundlage für die experimentellen und numerischen Untersuchungen zur Herstellung gerad- und schrägverzahnter Zahnräder im „Samanta“-Verfahren bildet der Aufbau entsprechender Prozesse. Kerninhalte sind die Festlegung der (Referenz-)Zahnradgeometrien, die Auslegung der Werkzeuge und die Wahl des Schmierstoffsystems. Die Durchführung der Umformversuche und die Charakterisierung der resultierenden Bauteil- und Prozesseigenschaften ermöglichen die Erarbeitung eines grundlegenden Prozessverständnisses und die Ableitung von Gemeinsamkeiten und Unterschieden bei der Herstellung von Gerad- und Schrägverzahnungen. Neben experimentellen Untersuchungen werden FE-Modelle aufgebaut, um die Prozesse simulativ abbilden und erforschen zu können.

5.1 Festlegung der Zahnradgeometrien

Der Aufbau der Prozesse basiert auf der Festlegung der Zahnradgeometrien. Die untersuchten Referenzzahnräder und deren Verzahnungsdaten werden in Bild 5a) gezeigt.

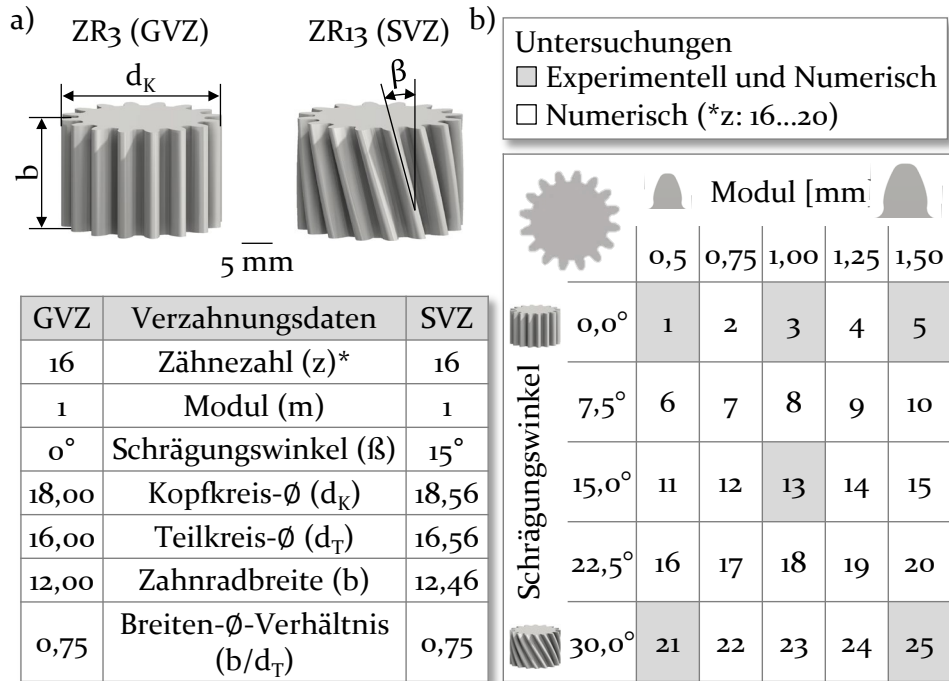


Bild 5: Referenzzahnräder ZR₃ und ZR₁₃ (a) sowie Versuchsplan (b)

Die Auswahl der Zahnraddaten ist an industriellen Anwendungsfällen, beispielsweise aus dem Automobilbereich, orientiert [184]. Auch ermöglicht die absolute Bauteilgröße der Zahnräder eine effiziente simulative Prozessforschung, da die Anzahl der Knoten und damit die erforderliche Rechenleistung für größere Komponenten steigen. Insbesondere Verzahnungselemente erfordern eine simulativ hochwertige numerische Darstellung und damit aufwendige Diskretisierung des Netzes [185].

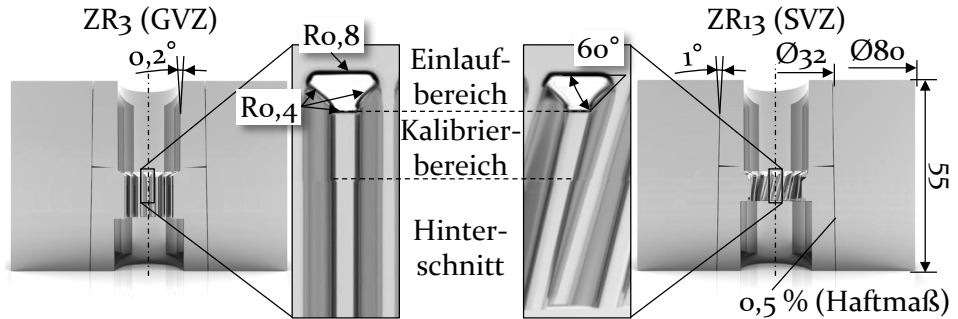
Die Zahnräder besitzen 16 Zähne, einen Modul von $m = 1$ und ein Breiten-Durchmesser-Verhältnis von 0,75. 16 Zähne stellt die Mindestanzahl dar, die ohne eine Veränderung der Zahnform durch eine Profilverschiebung zulässig ist. Für die Schrägverzahnung beträgt der Flankenwinkel $\beta = 15^\circ$. Infolgedessen resultieren durch die zahnradspezifischen Geometriezusammenhänge geringfügige Unterschiede im Kopfkreis- und Teilkreisdurchmesser sowie in der Zahnbreite. Grundsätzlich wurden die Daten beider Verzahnungsarten analog gewählt, um eine gute Vergleichbarkeit resultierender Bauteil- und Prozesseigenschaften zu ermöglichen.

Anhand dieser Referenzzahnradgeometrien (ZR₃ und ZR₁₃) wurde in numerischen Untersuchungen der Einfluss der Zähnezah auf das Prozessergebnis untersucht. Hierfür wurde die Zähnezah in fünf Stufen im Intervall von 16 bis 20 Zähnen variiert, wobei das Breiten-Durchmesserverhältnis konstant 0,75 beträgt.

Neben den Referenzen wurden Zahnräder mit veränderten Parametern, respektive dem Modul und/oder Schrägungswinkel festgelegt, um deren Einfluss auf die Bauteil- und Prozesseigenschaften zu erforschen. Innerhalb des Parameterraums werden in fünf Stufen der Modul von 0,5 bis 1,5 mm und der Schrägungswinkel von 0° bis 30° variiert, wobei das Breiten-Durchmesser-Verhältnis (0,75) ebenfalls konstant gehalten wird (Bild 5b). Hierzu erfolgen numerische Untersuchungen für die Zahnräder ZR₁ bis ZR₂₅. Neben den Referenzzahnradern (ZR₃ und ZR₁₃) werden in Umformversuchen die Zahnräder ZR₁, ZR₅, ZR₂₁ und ZR₂₅ hergestellt, um die abgeleiteten Erkenntnisse experimentell zu verifizieren.

5.2 Auslegung und Aufbau der Prozesse

Die verwendeten Werkzeugsysteme wurden entsprechend der festgelegten Zahnradgeometrien anhand empirischen Literatur- und Praxiswissens ausgelegt. Bild 6 zeigt das prinzipielle Werkzeugsystem für das gerad- (ZR₃) und schrägverzahnte (ZR₁₃) Referenzzahnrad, welches im Zuge der Untersuchungen für die Herstellung der Zahnräder eingesetzt wurde.

Bild 6: Werkzeugsysteme ZR₃ und ZR₁₃

Beide Werkzeugsysteme bestehen aus einer verzahnten Matrize, die durch einen Armierungsring radial vorgespannt werden. Gemäß industriellen Standards wurde ein Haftmaß von 0,5 % gewählt [120]. Die Abmessungen wurden analog für beide Verzahnungsarten anhand Literaturempfehlungen ausgelegt [186], wobei die Höhe 55 mm und der Außendurchmesser 80 mm beträgt. Die Matrizenbohrung besitzt ausgehend von der Umformzone eine geringe Konizität von 0,2°, um das Einlegen der Rohlinge zu erleichtern und ein Abstreifen des Schmierstoffs von der Oberfläche zu vermeiden. Zur Verbesserung der Zugänglichkeit beim Herstellungsprozess und zur Reduzierung des Beanspruchungsniveaus wurden die Matrizenkerne oberhalb des Schulterbereichs quergeteilt [118].

Im Einlaufbereich wurden typischerweise in der Praxis verwendete Werte für Radien im Bereich von 0,4 und 0,8 mm und ein Schulterwinkel von 60° gewählt. Die Formgebung der Zahnräder erfolgt im Kalibrierbereich, da dieser die Ist-Geometrie der Verzahnungen widerspiegelt. Im Hinter-schnittbereich wurde die Verzahnungskontur radial geringfügig vergrößert, wodurch kein Kontakt zwischen Bauteil und Werkzeug auftritt. Neben einer Abstützwirkung zur Vermeidung von Werkzeugbruch im Zahnbereich aufgrund hoher Prozesskräfte im Einlaufbereich wird hierdurch die Torsionssteifigkeit der Matrizenzähne im Fall der Schrägverzahnung verbessert. Die Länge des Bereichs ist für die Gerad- und Schrägverzahnung unterschiedlich, um beim Kaltfließpressen schrägverzahnter Zahnräder ein Verhaken der Bauteile und eine erneute Krafteinwirkung zu vermeiden. Zur Gewährleistung einer Vergleichbarkeit der Erkenntnisse innerhalb des Versuchsplans wurden die geometrischen Abmessungen der eingesetzten Werkzeugsysteme auf Basis von ZR₃ und ZR₁₃ entsprechend der Zahnradgröße/-parameter skaliert.

Die Werkzeuggeometrie wurde durch Erodieren (EDM) hergestellt, was standardmäßig im Bereich der Kaltmassivumformung bei der Herstellung anspruchsvoller Werkzeuge zur Anwendung kommt [101]. Die Nachbearbeitung des Verzahnungsbereichs erfolgte durch Extruderhonen. Um die Werkzeugleistungsfähigkeit zu erhöhen, wurde der Schulterbereich anschließend manuell poliert [187]. Zur Verbesserung der Verschleißfestigkeit wurde die polierte Oberfläche mit einer Multi-Layerschicht aus Titancarbonitrid (TiCN) [145] im PVD-Verfahren beschichtet [149].

Im Zuge der Prozessauslegung wurde als Schmierstoffsystem eine Kombination aus Zinkphosphat und Seife festgelegt. Dieses System kommt standardmäßig beim Kaltfließpressen von Bauteilen mit hohen Oberflächenvergrößerungen zum Einsatz [156]. Neben einer zuverlässigen Trennwirkung von Werkzeug und Werkstück wird eine niedrige Reibung erzielt. Ein Vergleich von Reibfaktoren für unterschiedliche Schmierstoffsysteme ist in Bild 7 gezeigt.

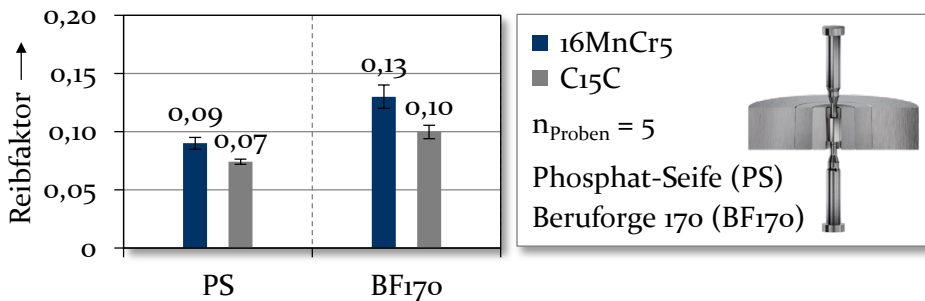


Bild 7: DCE-Test - Reibfaktoren für Phosphat-Seife (PS) und Beruforge 170 (BF170)

Zu erkennen sind die ermittelten Reibfaktoren für das Schmierstoffsystem Phosphat-Seife (PS) für die Stahlsorten 16MnCr5 und C15C. Diesen gegenübergestellt sind die identifizierten Reibfaktoren für Beruforge 170 (BF170). Beruforge 170 ist ein phosphatfreies umweltfreundliches einschichtschmiersystem aus Molybdändisulfid (MoS_2). Der Vergleich der resultierenden Reibbedingungen zeigt, dass für Phosphat-Seife geringere Reibfaktoren für beide Stahlwerkstoffe mit $0,09 \pm 0,01$ (16MnCr5) und $0,07 \pm 0,01$ (C15C) gegenüber $0,13 \pm 0,01$ (16MnCr5) und $0,10 \pm 0,01$ (C15C) für Beruforge 170 auftreten. Begründet wird die höhere Reibung von Beruforge 170 durch eine niedrigere Adhäsionsfestigkeit des Schmierstoffs auf der Bauteiloberfläche, woraus eine geringere Trennwirkung zwischen Bauteil und Werkzeug resultiert. Die durchweg niedrigeren Reibfaktoren für C15C im Vergleich zu 16MnCr5, sind auf die geringere Werkstofffestigkeit zurückzuführen.

5.3 Prozessführungsstrategie

Das Kaltfließpressen von Zahnrädern im „Samanta“-Verfahren erfolgt sequentiell. Um ein grundsätzliches Verständnis zum Prozessprinzip zu erhalten, ist in Bild 8 der schematische Ablauf für die Herstellung von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern visualisiert.

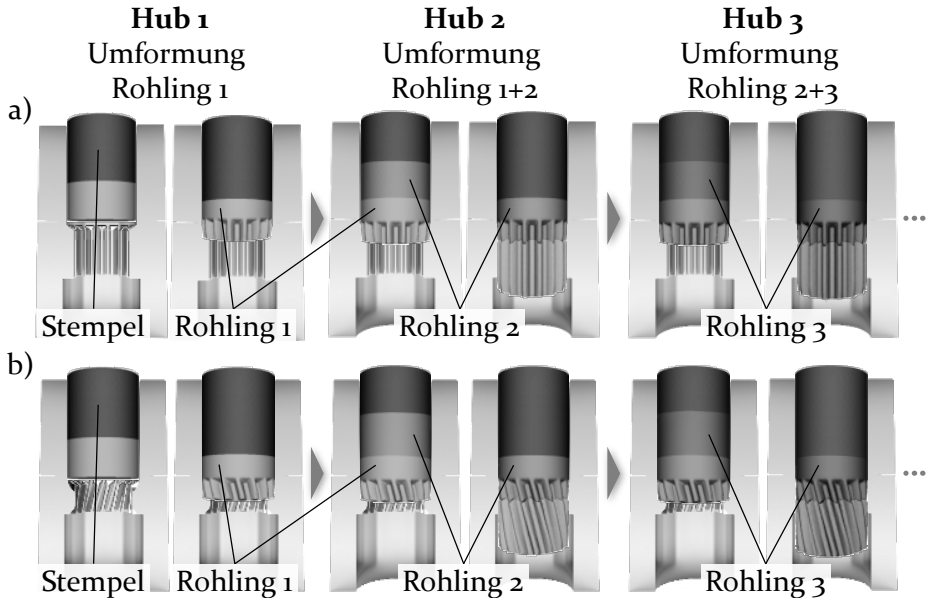


Bild 8: Prozessablauf beim Kaltfließpressen von gerad- (a) und schrägverzahnten (b) Zahnrädern im „Samanta“-Verfahren

Im Vergleich zur Geradverzahnung (Bild 8a) bedingt die Herstellung von Schrägverzahnungen (Bild 8b) eine Rotation des Rohlings während der Umformung. Die Herstellung der Zahnräder erfolgt in der Regel durch zwei Umformhübe. Nach dem dritten Hub wird ein erstes Zahnrad abgepresst, welches die Bedingungen einer Serienherstellung widerspiegelt. Der entsprechende Rohling wird innerhalb des zweiten Hubes eingelegt. Dieser drückt wiederum den ersten Rohling durch die Umformzone und stößt diesen aus dem Werkzeugsystem.

Grundsätzlich bewirkt zu Beginn der Umformung das Einleiten der Stempelkraft einen Setzvorgang des Rohlings, wodurch ein radialer Materialfluss und damit ein Anlegen des Rohlings an der Matrizenwandung hervorgerufen wird. Dieser Effekt wird repräsentativ anhand an eines halbumgeformten geradverzahnten Zahnrad (ZR₃) aus 16MnCr5 in Bild 9a gezeigt.

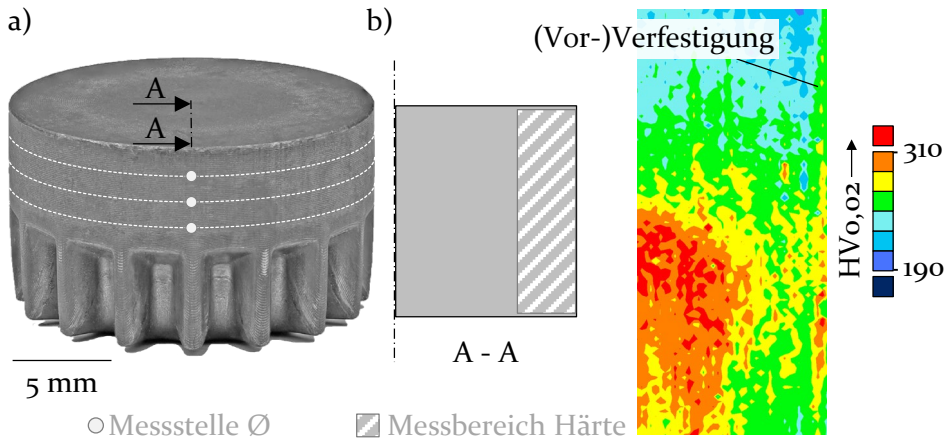


Bild 9: a) Setzvorgang und b) Verfestigung im Randbereich eines halbumgeformten geradzahnten Zahnrad

Im nicht umgeformten Bereich des Rohlings nimmt der Durchmesser infolge des Setzvorgangs zu. Dieser beträgt dort $18,06 \pm 0,01$ mm gegenüber dem Ausgangsdurchmesser von $17,95 \pm 0,01$ mm. Dies bestätigt, dass ein radialer Materialfluss durch das Einleiten der Stempelkraft initiiert wird und sich der Rohling an die leicht konische Matrizenwandung ($0,2^\circ$) anlegt.

Das Anlegen des Rohlings an die Matrizenwandung führt zu einem Kontakt, weshalb Reibung zwischen diesen beiden Komponenten auftritt. Dies bedingt eine (Vor-)Verfestigung randnaher Oberflächenbereiche des Rohlings vor dem Eintritt in die Umformzone. Dieser Effekt wird anhand der in Bild 9b gemessenen Härteverteilung im Bauteilquerschnitt verdeutlicht. Ausgehend vom Mittenbereich hin zur Randzone des Bauteils ist ein Anstieg der Härtewerte erkennbar. Auch in Abhängigkeit der Höhe steigen die Härtewerte aufgrund der Reibung an der Matrizenwandung an. Die Ausgangshärte für die Stahlsorte 16MnCr5 beträgt 235 ± 10 HV_{0,02}.

Innerhalb des in Bild 8 vorgestellten Verfahrensablaufs wurden im Rahmen dieser Arbeit die Zahnräder - unabhängig von Modul und Schrägungswinkel - hergestellt. Bei dieser Prozessführungsstrategie wird der Hub unterbrochen, sobald die halbe Rohlingshöhe umgeformt ist. Eine Prozessunterbrechung zu diesem Zeitpunkt ist gegenüber einer frühen oder späten Unterbrechung vorteilhaft. Hintergründe für die Wahl dieser Strategie sind in Bild 10 zusammengefasst.

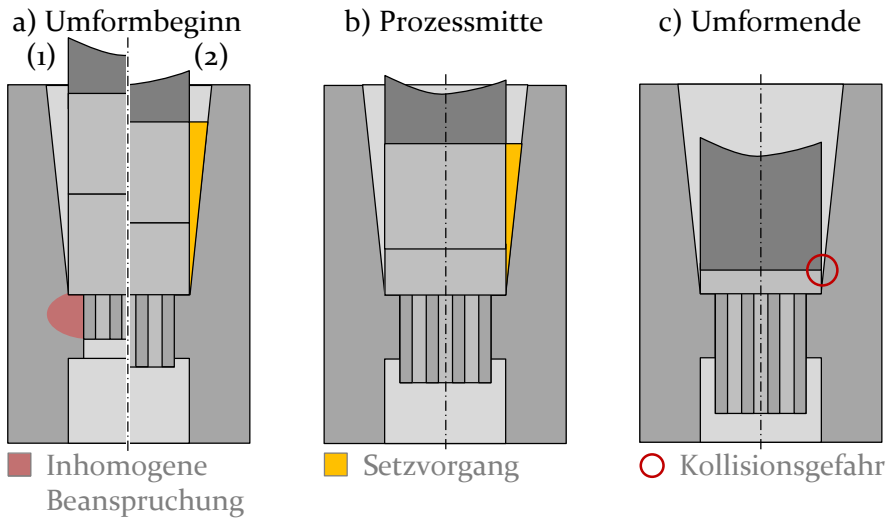


Bild 10: Prozessunterbrechung beim Kaltfließpressen von Zahnrädern im „Samanta“-Verfahren: a) Umformbeginn, b) Prozessmitte und c) Umformende

Bei einer frühen Prozessunterbrechung (Bild 10a) folgt beim Entlasten im Rückhub des Stempels ein inhomogener Spannungs- und Dehnungszustand im Verzahnungsbereich der Matrize (1), da der Rohling nur teilweise in die Kavität eingepresst wurde. Zudem resultiert ein insgesamt längerer Umformweg der Rohlinge entlang der Matrizenwandung. Unter Berücksichtigung des auftretenden Setzvorgangs (Bild 9a) zu Beginn der Umformung wird eine Verfestigung des Randbereichs aufgrund einer größeren Reibzone begünstigt. Zudem ist ein Abstreifen des Schmierstoffs möglich, wodurch eine Härtezunahme im Randbereich verstärkt wird. Eine (Vor-)Verfestigung der Randzone kann das Formfüllungsverhalten in die Werkzeugkavitäten negativ beeinflussen und ein axiales Voreilen des Materialflusses im Mittenbereich verstärken.

Im Fall einer späten Prozessunterbrechung (Bild 10c) besteht die Gefahr einer Werkzeugkollision des Stempels mit der Umformzone der Matrize. Auch könnte es durch einen höheren Stempelhub zu einer Gratbildung am Bauteil kommen, wenn das Material um den Stempel fließt, da zwischen dem Stempel und der Matrizenbohrung grundsätzlich ein gewisses Spiel nötig ist, um einen Kontakt beider Aktivteile zu vermeiden.

Die gewählte Prozessunterbrechung (b) stellt somit einen anwendungsgerechten Kompromiss dar, um negative Auswirkungen auf das Prozessergebnis möglichst zu vermeiden. Ferner wurde in den Untersuchungen kein Einfluss der Prozessunterbrechung auf die Bauteiloberfläche festgestellt.

5.4 Charakterisierung der Bauteil- und Prozesseigenschaften

Die umfassende Charakterisierung der Bauteil- und Prozesseigenschaften ist von zentraler Bedeutung. Dies bildet die Basis, um ein grundlegendes Prozessverständnis für die Herstellung von gerad- und schrägverzahnten Zahnradern im „Samanta“-Verfahren erarbeiten zu können.

Bauteileigenschaften

Bauteilseitig erfolgt die Ermittlung geometrischer Merkmale hinsichtlich der nutzbaren Höhe und der Verzahnungsgenauigkeit. Zudem werden die mechanischen Eigenschaften und das Gefüge näher betrachtet.

Nutzbare Höhe

Nach dem „Samanta“-Verfahren hergestellte Zahnräder weisen charakteristische Merkmale auf. Bild 11 zeigt ein kaltfließgepresstes gerad- (ZR₃) und schrägverzahntes (ZR₁₃) Zahnrad.

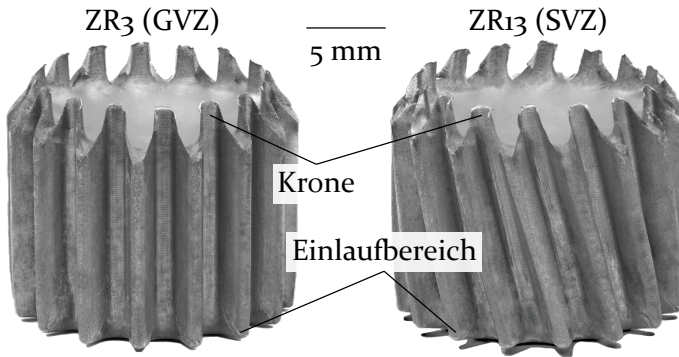
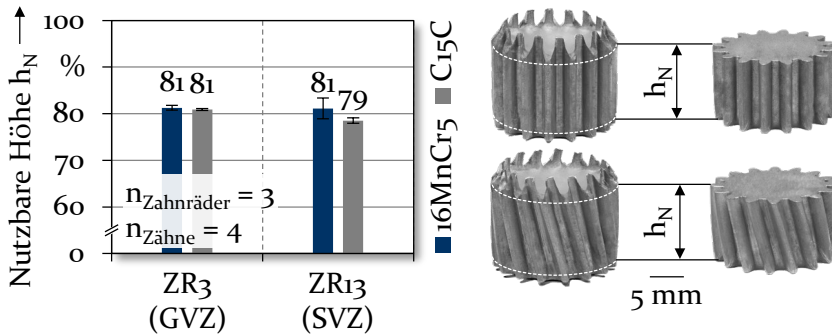


Bild 11: Kaltfließgepresste Zahnräder ZR₃ und ZR₁₃

An beiden Zahnradtypen entsteht der für eine Kaltumformung nach dem „Samanta“-Prinzip typische Einlauf- und Kronenbereich. Diese Bauteilbereiche erfordern eine nachgeschaltete spanende Bearbeitung, um parallele Stirnflächen zu erzeugen [53].

Um diese Nacharbeit zu berücksichtigen und eine Aussage über die erreichte Materialausnutzung zu erhalten, wurde die nutzbare Höhe h_N der Zahnräder bestimmt [188]. Diese gibt den prozentual nutzbaren Anteil der Soll-Zahnradbreite b wieder. Die Ergebnisse der Auswertung hinsichtlich des nutzbaren Anteils sind für beide Zahnräder und Werkstoffe in Bild 12 gegenübergestellt.

Bild 12: Nutzbare Höhe h_N ; ZR3 und ZR13

Für beide Zahnräder liegt der Anteil der nutzbaren Höhe h_N im Bereich von 80 %. Im Vergleich zur Materialausnutzung spanender Prozesse sind prinzipiell Einsparungen von bis zu 50 % möglich [51]. Innerhalb der Verzahnungsarten und Stahlwerkstoffe ist kein wesentlicher Unterschied für die ermittelten nutzbaren Bereiche zu erkennen.

Die Ausbildung der charakteristischen Bauteilbereiche, also des Einlauf- und Kronenbereichs, resultiert aufgrund des Stoffflusses während der Umformung [189]. Dieser Effekt ist schematisch in Bild 13 skizziert.

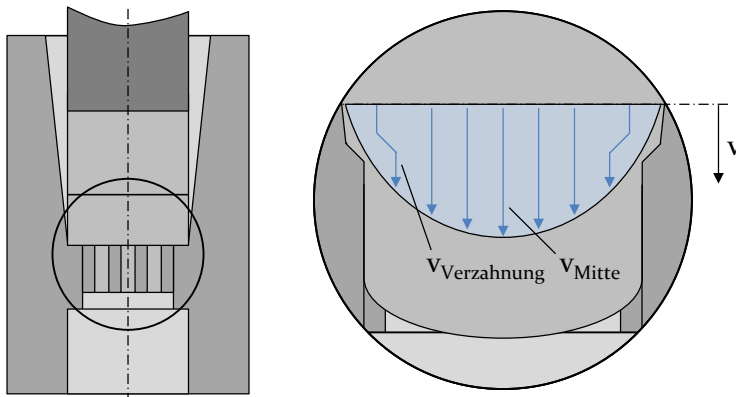


Bild 13: Modellvorstellung: Schematischer Materialfluss während der Umformung

Durch die axiale Stempelbewegung wird der Rohling in die Umformzone und damit in die formgebenden Kavitäten der Matrize gepresst. Aufgrund der vergleichsweise hohen Formänderung sowie der auftretenden Reibung wird der Materialfluss beim Eintritt in den Verzahnungsbereich abgebremst. Gegenüber dem Mittenbereich (v_{Mitte}) ist die Materialflussgeschwindigkeit in den Verzahnungskavitäten ($v_{\text{Verzahnung}}$) in axialer Richtung um über 10 % geringer, was in simulativen Stoffflussanalysen ermittelt wurde. Dies bedingt ein Voreilen des Materials im Mittenbereich

des Zahnrad und damit die Ausformung eines Einlauf- und Kronenbereichs was die Materialeffizienz beeinflusst.

Verzahnungsgenauigkeit

Um die Verzahnungsgenauigkeit zu ermitteln, wurde die Profillinien- und Flankenlinienabweichung bestimmt, welche entscheidende Kenngrößen zur Bewertung der Verzahnungsqualität sind [181]. Die Ergebnisse sind in Bild 14 für ZR3 und ZR13 zusammengefasst.

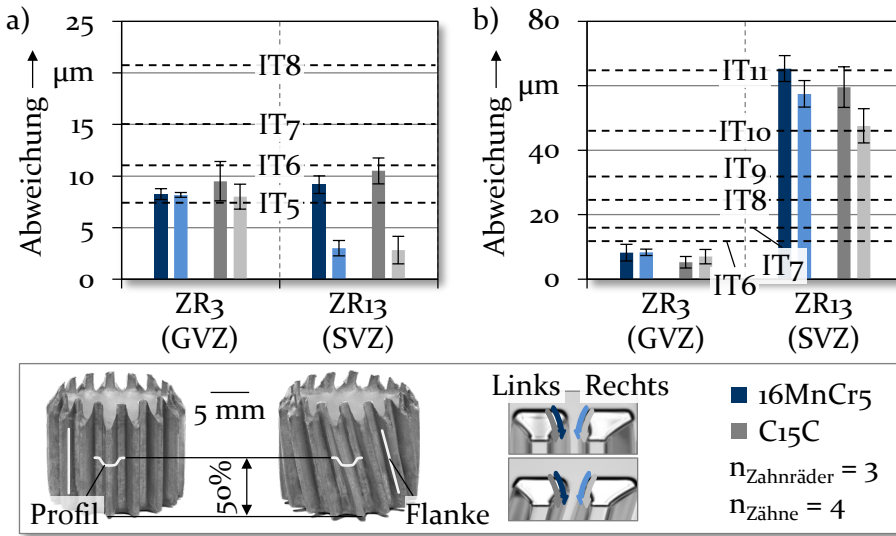


Bild 14: Bauteilgenauigkeit ZR3 und ZR13: a) Profil- und b) Flankenlinienabweichung

Hinsichtlich der Profilabweichung (Bild 14a) wird im Mittel für beide Stahlsorten eine Toleranzklasse von 6 erzielt. Infolge einer Umlenkung des Werkstoffflusses im Bereich des Verzahnungseinlaufs kommt es im Fall der Schrägverzahnung zu einer asymmetrischen Verteilung.

Für die Flankenlinienabweichung (Bild 14b) erreichen die gradverzahn-ten Zahnräder eine Toleranzklasse von 6. Wie zu erwarten, liegen für die Schrägverzahnung größere Abweichungen vor und es resultieren im Durchschnitt Werte im Bereich der Toleranzklasse 11. Folglich wird der festgelegte Schrägungswinkel von 15° nicht erreicht. Die Messdaten ermöglichen die Berechnung des erzielten Winkels aus dem Verhältnis der Abweichung zur Sollflankenlinie und der Prüflänge. Im Mittel beträgt der entsprechende Flankenwinkel $14,5^\circ$ für 16MnCr5 und $14,6^\circ$ für C15C.

Eine mögliche Erklärung für die auftretende Flankenabweichung ist, dass aufgrund der hohen Prozesskräfte die schrägverzahn-ten Matrizen- zähne

durch die auftretende Biegespannung infolge des Materialflusses elastisch verformt werden und dadurch der Schrägungswinkel reduziert wird [190]. Dieser Zusammenhang ist in Bild 15 schematisch dargestellt.

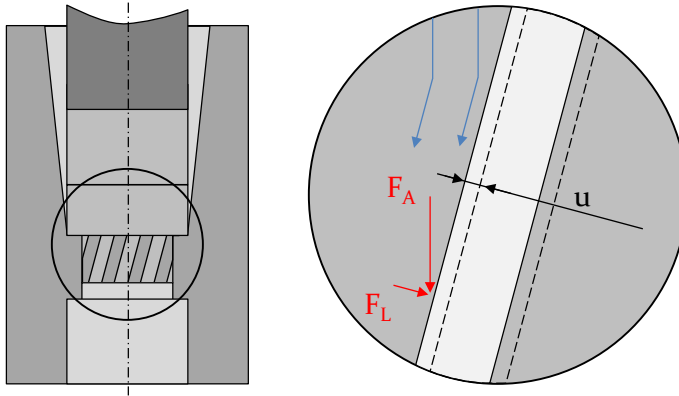


Bild 15: Modellvorstellung: Elastische Deformation von schrägverzahnten Matrizenzähnen während der Umformung

Durch den Druck des Werkstoffs auf die schrägverzahnten Matrizenzähne während der Formgebung ist eine elastische Deformation dieser möglich. Infolgedessen wird der Schrägungswinkel geringer und damit die Flankenabweichung der Zahnräder negativ beeinflusst. Das Festigkeitsniveau der umgeformten Stahlsorte und der damit verbundene Kraftbedarf können zu einer unterschiedlichen Ausprägung der elastischen Verformung der Matrizenzähne führen.

Ein weiterer Einflussfaktor auf den erreichbaren Schrägungswinkel der Zahnräder ist eine elastische Rückfederung nach dem Entformen der Bauteile aus dem Verzahnungsbereich der Matrize [191]. Das auftretende Rückfederungsverhalten ist werkstoffspezifisch [192], wodurch Maß- und Formabweichungen in Abhängigkeit des eingesetzten Zahnradwerkstoffs beeinflusst werden.

Mechanische Eigenschaften

Die Umlenkung des Stoffflusses im Fall von Schrägverzahnungen beeinflusst die resultierende Bauteilgenauigkeit. Neben diesem ist auch ein Einfluss auf die Gefügeeigenschaften zu vermuten. Um dies zu untersuchen, zeigt Bild 16 exemplarisch die Gefügestruktur und Härteverteilung eines Zahns in der Bauteilmitte für ZR₃ und ZR₁₃.

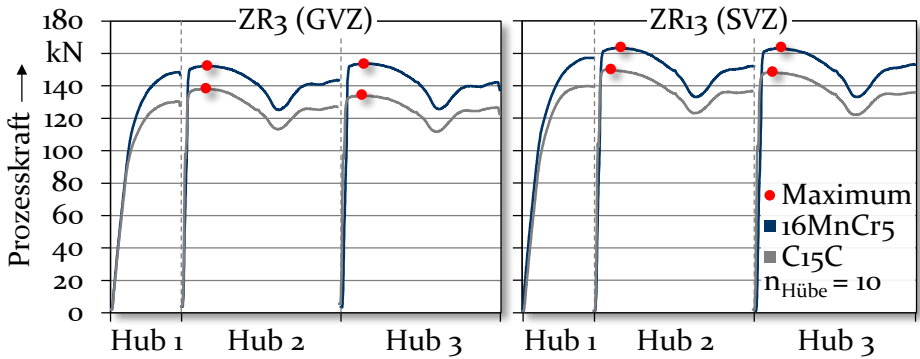


Bild 17: Prozesskräfte: Kraftverläufe ZR3 und ZR13

Der Kurvenverlauf ist innerhalb der Zahnradtypen und Stahlsorten vergleichbar. Nach dem Einlegen des ersten Rohlings (Hub 1) steigt die Umformkraft bis zur Prozessunterbrechung kontinuierlich an. Der Prozess wird angehalten, sobald die untere Hälfte des Rohlings in die Umformzone gedrückt wurde. Anschließend wird der zweite Rohling in das Werkzeugsystem eingelegt (Hub 2) und sobald der Stempel in Kontakt mit diesem steht, steigt die Kraft durch eine größere Reibfläche bis zum Erreichen der Maximalkraft etwas an. Nach Überschreiten der maximalen Prozesskraft nimmt die Kraft ab und das noch nicht umgeformte Bauteilvolumen wird durch die Matrize gedrückt. Durch das Einpressen des zweiten Rohlings in die Umformzone steigt die Umformkraft erneut an. Die Kraftkurve für Hub 2 ist repräsentativ für folgende Zyklen.

Zur Auswahl des Umformequipments sind die maximal auftretenden Prozesskräfte entscheidend [185]. Die Auswertung der Prozesskraftmaxima von ZR3 und ZR13 für beide Stahlwerkstoffe ist in Bild 18 dargestellt.

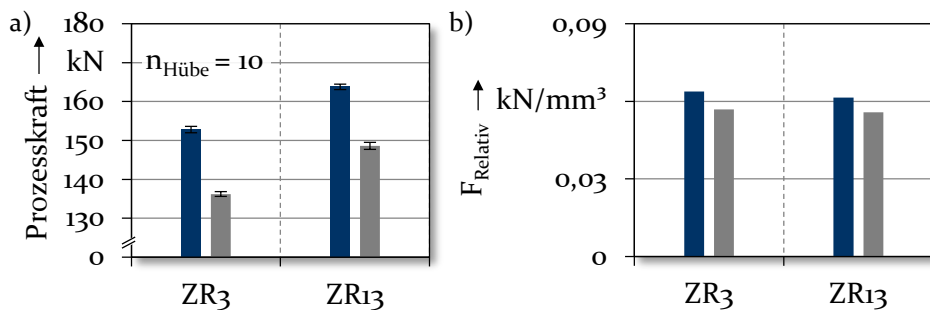


Bild 18: Prozesskräfte: a) Maxima und b) relative Prozesskraft

Die Kraftmaxima bei der Umformung von 16MnCr5 liegen für das geradverzahnte Zahnrad bei $152,8 \pm 0,8$ kN und für das schrägverzahnte Zahnrad bei $163,8 \pm 0,7$ kN (Bild 18a). Aufgrund des niedrigeren Festigkeitsniveaus von C15C sind die Maximalwerte mit $136,2 \pm 0,6$ kN (ZR3) und $148,6 \pm 0,9$ kN (ZR13) um circa 10 % geringer.

Absolut gesehen erfordert die Herstellung der schrägverzahnten Zahnräder höhere Prozesskräfte. Da der Schrägungswinkel β aufgrund der zahnradspezifischen Geometriezusammenhänge den Durchmesser des Zahnrad vergrößert (Bild 5), folgt ein Anstieg des Bauteilvolumens. Um zu überprüfen, ob die höheren Umformkräfte innerhalb der Verzahnungsarten durch das Volumen beeinflusst werden, wurde die relative Prozesskraft F_{Relativ} berechnet. Diese Größe gibt das Verhältnis der maximalen Prozesskraft zum Zahnradvolumen der Soll-Geometrie an (1).

$$F_{\text{Relativ}} = \frac{F_{\text{Max}}}{V_{\text{Zahnrad}}} \quad (1)$$

Die berechneten Werte für die relative Prozesskraft sind in Bild 18b) dargestellt. Die Werte für die schrägverzahnten Zahnräder sind mit $0,061$ kN/mm³ (16MnCr5) und $0,055$ kN/mm³ (C15C) etwas niedriger als die Werte von $0,064$ kN/mm³ (16MnCr5) und $0,057$ kN/mm³ (C15C) der geradverzahnten Zahnräder. Entgegen intuitiver Erwartungen erhöht der Schrägungswinkel nicht direkt die erforderlichen Prozesskräfte. Erklärbar ist dies aufgrund des Stoffflusses in den jeweiligen Verzahnungsbereich, wodurch eine unterschiedliche Wirkzone - also Kontaktfläche - resultiert und spezifische Reibbedingungen in beiden Prozessen bewirkt (Bild 19).

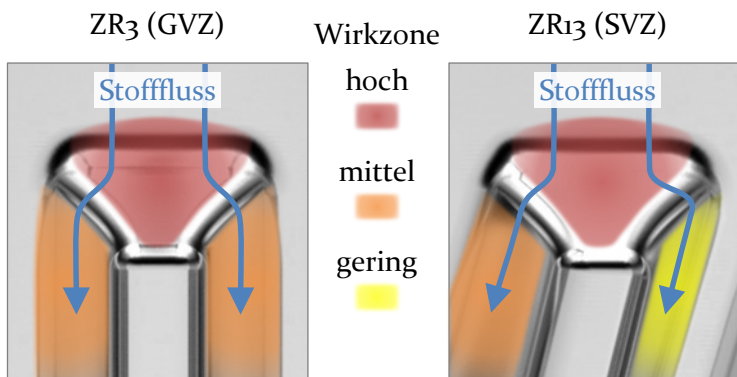


Bild 19: Modellvorstellung: Stofffluss und resultierende Wirkzonen für gerad- und schrägverzahnte Matrizen während der Umformung

Im Fall der Geradverzahnung bewirkt die symmetrische Umformzone eine größere Kontaktfläche mit dem in die Verzahnungskavität fließenden Material, wodurch die Reibung erhöht wird und einen Anstieg der Umformkräfte zur Folge hat. Für die Schrägverzahnung liegt aufgrund der Umlenkung des Materialflusses eine insgesamt geringere Kontaktfläche vor, da das Material im Einlaufbereich der Verzahnung um den Matrizen Zahn herumfließt und den direkten Kontakt mit der Seitenfläche der Matrize reduziert.

Werkzeugbeanspruchung

Die erzielbare Werkzeugstandmenge hat entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Umformprozesses [101]. Um einen prinzipiellen Eindruck über die auftretende Beanspruchungssituation für die gerad- und schrägverzahnenden Matrizen während der Umformung zu erhalten, wird diese in Bild 20 qualitativ gezeigt.

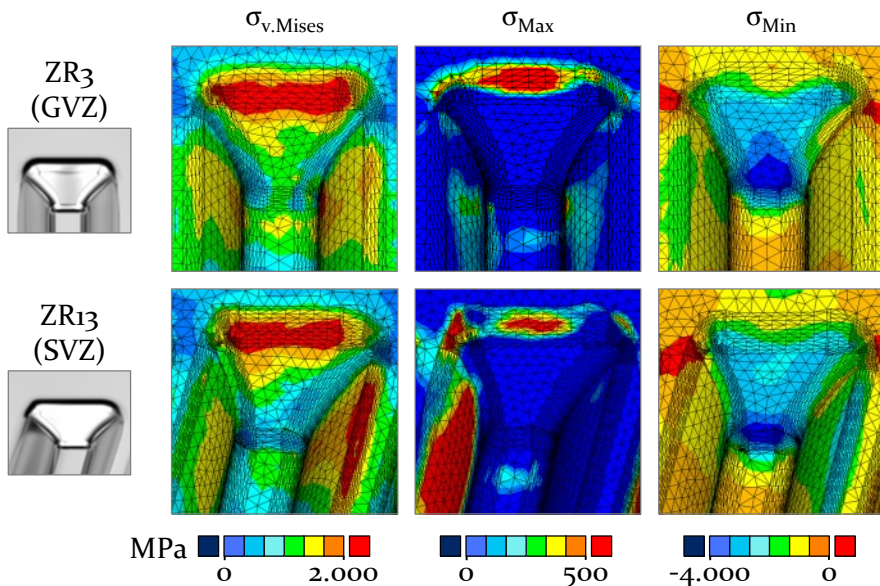


Bild 20: Maximale Werkzeugbeanspruchung: Matrizen ZR3 und ZR13

Zur Bewertung der auftretenden maximalen Werkzeugbeanspruchung wurden versagensrelevante Spannungskomponenten in kritischen Bereichen der Matrize analysiert. In diesem Kontext wurde $\sigma_{v.Mises}$ herangezogen, um Spannungskonzentrationen zu identifizieren [192]. Weiterhin wurden die Hauptspannungen σ_{Max} und σ_{Min} betrachtet, um kritische Zug- und Druckspannungszustände zu ermitteln [19]. Der Materialfluss bewirkt im Schulterbereich der Matrizen das Auftreten eines Biegemoments,

welches Spannungskonzentrationen hervorruft. Dieser Beanspruchungsfall ist auch typisch für den Einsatz von Vorwärtsfließpressmatrizen [19]. Folglich sind kritische Werkzeugbereiche der Schulterbereich und die Seitenbereiche der Matrizenzähne, da hier beim Kaltfließpressen ein erhöhtes Risiko zur Rissinitiierung und/oder Zahnbruch vorliegt.

Die Werte liegen in diesem Bereich für $\sigma_{v.Mises}$ bei rund 2.000 MPa. Im Fall der Geradverzahnung betragen die Spannungen im Seitenbereich der Matrizen mitunter über 1.300 MPa. Bei der schrägverzahnten Matrize liegt eine asymmetrische Verteilung vor, da die Ausformung des Schrägungswinkels zusätzlich Spannungen im rechten Seitenbereich des Matrizenzahns hervorruft. Die Spannungswerte liegen dort auf einem vergleichbaren Niveau zum Mittenbereich mit Werten von rund 2.000 MPa. Infolge des auftretenden Biegemoments werden risskritische Zugbeanspruchungen (σ_{Min}) im Schulterbereich beider Verzahnungsmatrizen mit Werten im Bereich von 500 MPa initiiert. Im Fall der Schrägverzahnung entstehen infolge des Kontaktdruckes auf den Matrizenzahn zusätzlich Zugspannungen auf der linken Seitenfläche. Die Ausformung der Verzahnungen bewirkt eine ausgeprägte Druckbeanspruchung (σ_{Max}) der Matrizenzähne mit lokalen Maximalwerten von bis zu - 3.500 MPa an der Zahnspitze. Die schrägverzahnte Matrize wird durch den Kontaktdruck auf die linke Seitenfläche im rechten Seitenbereich gestaucht, wodurch dort zusätzliche Druckspannungen resultieren.

Die grundsätzliche unterschiedliche Beanspruchungssituation für gerad- und schrägverzahnte Matrizen ist hinsichtlich geometrischer Kraftanteile schematisch in Bild 21 dargestellt.

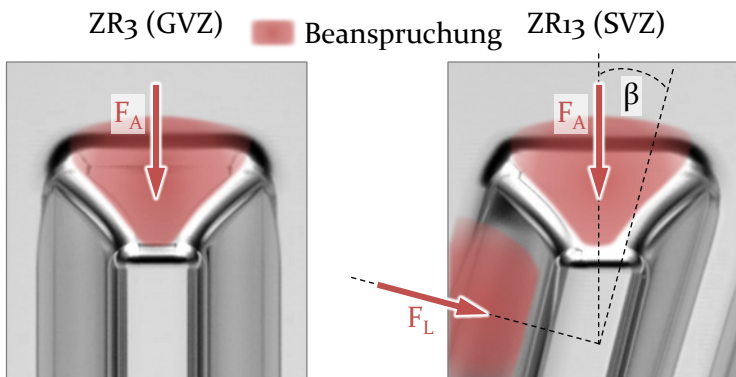


Bild 21: Modellvorstellung: Auftretende Beanspruchungssituation für gerad- und schrägverzahnte Matrizen während der Umformung

Bei geradverzahnten Matrizen wird durch den Werkstofffluss der Schulterbereich überwiegend in axialer Richtung (F_A) beansprucht. Zusätzlich zu dieser bedingt die Ausformung von Schrägverzahnungen einen lateralen Kraftanteil (F_L) auf die Seitenbereiche der Matrizenzähne. Die resultierende Kraftwirkung wird maßgeblich vom Schrägungswinkel β bestimmt.

5.5 Vergleichende Betrachtung von Gerad- und Schrägverzahnungen

Um das „Samanta“-Verfahren effizient anwenden und das Prozessergebnis zu verbessern, ist ein tiefgehendes Prozessverständnis notwendig. Dahingehend wurden die Ergebnisse von Herstellung der Referenzzahnrad (ZR3 und ZR13) genutzt, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede beim Kaltfließpressen von Gerad- und Schrägverzahnungen durch Analyse der Bauteil- und Prozesseigenschaften abzuleiten. Die Erkenntnisse sind in Bild 22 dargestellt.

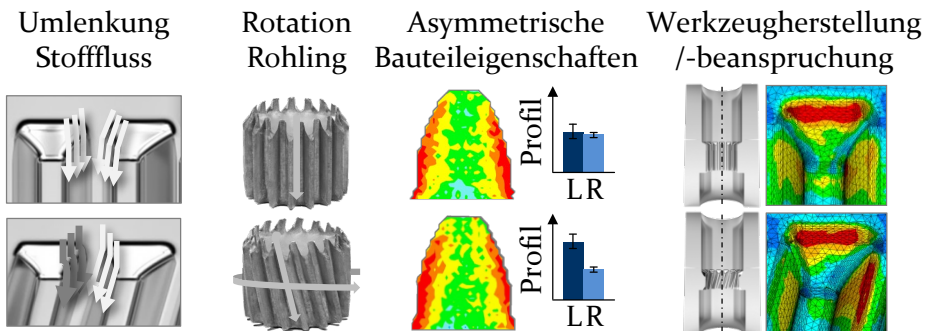


Bild 22: Vergleichende Analyse: Herstellung von Gerad- und Schrägverzahnungen

Die Ausformung einer Schrägverzahnung bedingt die Umlenkung des Werkstoffflusses im Verzahnungseinlauf der Matrize. Dies bewirkt neben einer Rotation des Rohlings während der Umformung die Ausbildung asymmetrischer Bauteileigenschaften hinsichtlich geometrischer und gefügespezifischer Aspekte. Dieser Effekt ist für beide Stahlsorten festzustellen.

Die Auswertung der nutzbaren Höhen h_N ergibt keine wesentlichen Unterschiede innerhalb der Verzahnungsarten und Werkstoffe. Die Materialeffizienz liegt im Bereich von 80 %.

Mit Ausnahme der Winkelabweichung im Fall der Schrägverzahnung erreichen die kaltfließgepressten Zahnrad eine Verzahnungsqualität mit

Abweichungen innerhalb einer Toleranzklasse von 6. Durch die Umlenkung des Stoffflusses beim Fließpressen schrägverzahnter Zahnräder liegen innerhalb der linken und rechten Zahnseite unterschiedliche Werte für die Profil- und Flankenlinienabweichung vor. Zur Realisierung des spezifizierten Flankenwinkels für die schrägverzahnten Zahnräder ist ein möglicher Ansatz eine Vorkorrektur der eingesetzten Matrize im Verzahnungsbereich. In diesem Zusammenhang wird der Winkel der Matrizenzähne auf Basis der gemessenen Flankenabweichung an den hergestellten Zahnrädern erhöht. Dieser Ansatz gilt im Allgemeinen für das Kaltfließpressen von Schrägverzahnungen, da aufgrund der genannten Werkzeug- und Materialeinflüsse eine Abweichung vom Nennwinkel zu erwarten ist, die aufgrund der komplexen Umformbedingungen im Zuge der Prozessauslegung nur bedingt vorhersagbar ist.

Der hervorgerufene Stofffluss während der Umformung beeinflusst die mechanischen Eigenschaften im Verzahnungsbereich der Zahnräder. Im Fall der Geradverzahnung resultiert eine symmetrische Härteverteilung innerhalb der beiden Zahnseiten. Aufgrund der Umlenkung des Materialflusses bei der Herstellung einer Schrägverzahnung werden auf der linken Zahnseite höhere Härtewerte gegenüber der rechten Seite erreicht.

Aus werkzeugtechnischer Sicht ist eine Herstellung schrägverzahnter gegenüber geradverzahnter Matrizen aufgrund der kombinierten axialen Bewegung und radialen Verdrehung der Elektrode als anspruchsvoller einzustufen. Weiterhin ist das während der Umformung auftretende Beanspruchungsniveau kritischer. Im Schulterbereich beider Verzahnungsmatrizen treten vergleichbare Spannungsmaxima auf. Jedoch bewirkt der hervorgerufene Stofffluss bei der Ausformung einer Schrägverzahnung eine zusätzliche Spannungskonzentration im Seitenbereich der Matrizenzähne. Im linken Seitenbereich werden Zugspannungen und im rechten Bereich des Matrizenzahns Druckspannungszustände initiiert.

5.6 Virtuelle Prozessmodellierung

Moderne Simulationswerkzeuge sind ein wichtiges Instrument zur effizienten und effektiven Prozessauslegung [193] und -analyse [194]. Im Stadium der Produkt- und Prozessentwicklung ist hierdurch ein Verzicht auf kosten- und zeitintensive experimentelle Untersuchungen im Sinne des „Trial-and-Error“-Verfahrens möglich [15]. Bei der Anwendung numerischer Methoden stellt die Beurteilung der Aussagekraft der berechneten Ergebnisse einen entscheidenden Schritt dar [195], um diese für den Einsatz zu qualifizieren [196].

Im Zuge der virtuellen Prozessmodellierung wurden für die untersuchten Kaltfließpressprozesse entsprechende FE-Modelle aufgebaut. Der zugrundeliegende Aufbau erfolgte für beide Verzahnungstypen analog zu der in Bild 8 vorgestellten Prozessabfolge. Zur Prozesssimulation kommt die in der Wissenschaft und Industrie etablierte Simulationssoftware FORGE NxT der Firma Transvalor zum Einsatz. Innerhalb des FE-Programms werden für beide Umformprozesse der Stofffluss und die auftretende Werkzeugbeanspruchung in zwei separate Schritte aufgeteilt. Eine solche entkoppelte Berechnung stellt den Stand der Technik dar, um effiziente Rechenzeiten und gleichzeitig qualitativ hochwertige Ergebnisse für anspruchsvolle Umformoperationen zu gewährleisten [197]. Innerhalb der FE-Analyse ist es erforderlich, die verwendeten Körper in Finite Elemente zu diskretisieren (Bild 23).

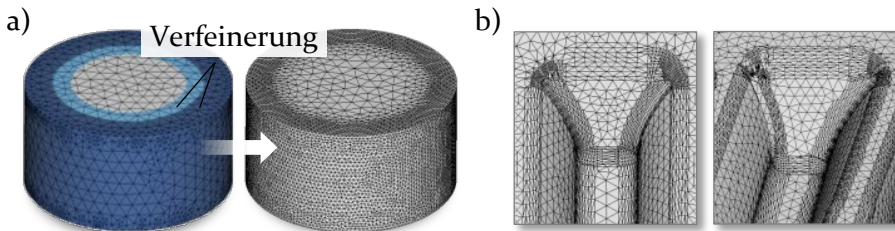


Bild 23: FE-Netz: a) Werkstück und b) Werkzeug

Das durch den Vernetzer erzeugte volumetrische Netz für die Rohlinge (Bild 23a) besteht aus Tetraeder-Elementen. Zur Reduzierung der Rechenkapazität bei gleichzeitig hochwertiger Auflösungsgenauigkeit im Verzahnungsbereich wird das Netz durch zwei Verfeinerungsboxen lokal verfeinert. Die Startwerte der Elementkantenlängen betragen im Bauteilzentrum 2,7 mm, im Übergangsbereich 0,8 mm und im Außenbereich 0,3 mm. Um die bei der Umformung entstehende Verzerrung des FE-Netzes zu kompensieren, erfolgt eine automatische Neuvernetzung anhand programminterner festgelegter Kriterien. Hierdurch wird das Netz lokal entzerrt. Im Bedarfsfall wird zusätzlich die Elementkantenlänge insbesondere bei der Ausformung von filigranen Konturelementen sukzessive verfeinert, was durch den Solver automatisiert geregelt wird.

Die verwendeten Werkzeugelemente (Bild 23b) sind als Starrkörper implementiert. Für die Werkzeuge erfolgt innerhalb der Stoffflusssimulation zur Abbildung der Kontur zunächst eine Oberflächenvernetzung mit Tetraeder-Elementen. Für die folgende Werkzeugbeanspruchungsanalyse werden die Körper volumetrisch vernetzt. In diesen Analysen werden durch die Herstellung eingebrachte und/oder in Verschleißschutzschich-

ten vorhandene (Eigen-)Spannungszustände an der Werkzeugoberfläche nicht berücksichtigt. Bei der Analyse der ermittelten absoluten Spannungswerte ist daher eine Überlagerung und mögliche Verschiebung in versagensunkritischere Spannungsbereiche beim Werkzeugeinsatz in der Praxis zu berücksichtigen.

Um die Praxisbedingungen möglichst realitätsnah zu modellieren, wurde werkstoffseitig die in den Stauchversuchen ermittelte Fließkurve (Bild 2) des verwendeten Stahls 16MnCr5 (1.7131) hinterlegt. Zur Abbildung der tribologischen Bedingungen wurde der im Laborversuch quantifizierte Reibfaktor genutzt.

Zur Bewertung der Prognosegüte der verwendeten FE-Modelle der Zahnradprozesse erfolgte ein Rückgriff auf etablierte Methoden in Forschung und Industrie [179]. In diesem Sinne wurden die resultierenden Bauteil- und Prozesseigenschaften beim Kaltfließpressen der gerad- und schrägverzahnten Zahnräder den numerischen Ergebnissen gegenübergestellt.

Ableich Experiment und Simulation: Bauteileigenschaften

Aus bauteilseitiger Sicht wurden geometrische und gefügetechnische Aspekte als Vergleichskriterium herangezogen. Den Abgleich der experimentellen und simulativen Bauteileigenschaften zeigt Bild 24.

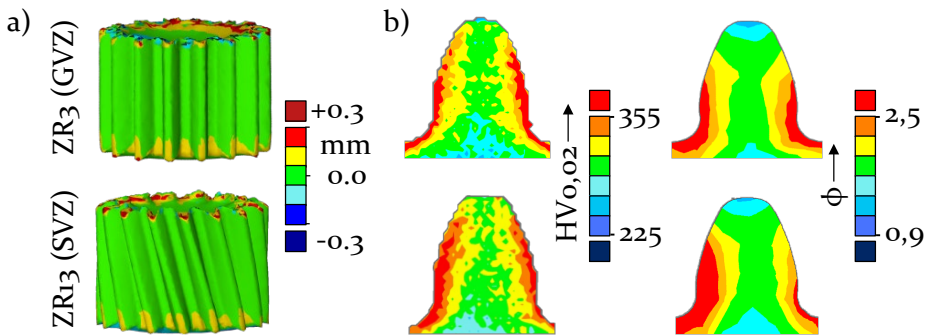


Bild 24: Validierung FE-Modelle: a) Bauteilgeometrie und b) mechanische Eigenschaften

Im Hinblick auf die Bauteilgeometrie (Bild 24a) erfolgte ein Geometrievergleich der digitalisierten, experimentell kaltfließgepressten Zahnräder mit den CAD-Daten der Zahnräder aus der Simulation. Die geometrische Analyse gibt letztlich Aufschluss über die auftretenden Abweichungen beider Geometrien. Durch die Prozesssimulation wird eine hohe Abbildungsgenauigkeit erzielt. Geringe Abweichungen treten im oberen und unteren Bauteilbereich, im Übergang zwischen den Zahnrädern während der Umformung, auf. Diese Bauteilbereiche sind als unkritisch einzustu-

fen, da diese in der Praxis durch Zerspanungsprozesse nachbearbeitet werden. Die erzielte Prognosequalität für den Verzahnungsbereich bildet eine geeignete Basis für die Erforschung von Maßnahmen zur Steigerung der Verzahnungsgenauigkeit.

Weiterhin erfolgte ein repräsentativer Vergleich der experimentell gemessenen und numerisch berechneten mechanischen Eigenschaften im Verzahnungsbereich (Bild 24b). Die Gegenüberstellung der Härte- und Umformgradverteilung zeigt eine hohe qualitative Übereinstimmung. Insbesondere höherverfestigte Bereiche werden durch die Simulation präzise vorhergesagt. Innerhalb der Härtemessungen wird die Auflösungs-genauigkeit durch ein einheitliches Messraster mit entsprechenden Punktabständen limitiert, wodurch die Qualität des Vergleichs beeinflusst wird.

Abgleich Experiment und Simulation: Prozesseigenschaften

Prozessseitig wurden die experimentellen und numerischen Kraftverläufe und deren Maxima für beide Zahnradprozesse gegenübergestellt. In Bild 25 wird dieser Abgleich von Experiment und Simulation visualisiert.

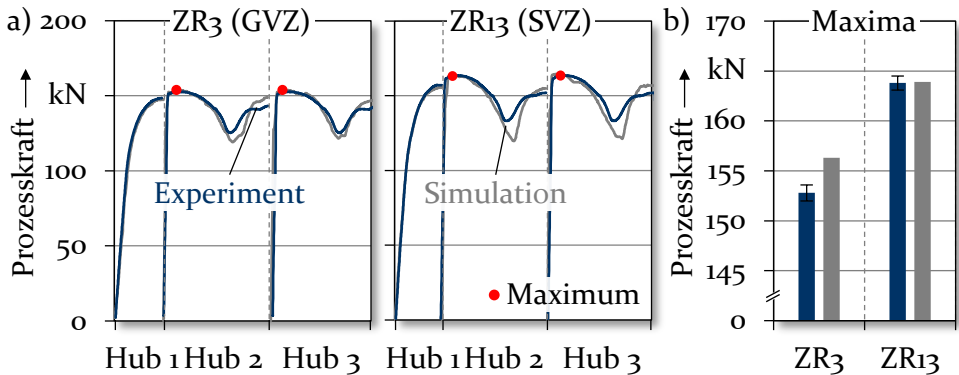


Bild 25: Validierung FE-Modelle: Prozesskraftverläufe (a) und -maxima (b)

Durch die FE-Modelle werden die Prozesskraftverläufe über die drei Hübe qualitativ hochwertig abgebildet (Bild 25a). Im Übergangsbereich beim Austritt des Rohlings und Eintritt des nächsten Rohlings in die Umformzone treten geringfügige Unterschiede auf und erforderliche Prozesskräfte werden durch die Simulation unterschätzt. In dieser Zone liegen besondere tribologische Anforderungen vor, weshalb Abweichungen auf Reibungseffekte zurückzuführen sind, die innerhalb der Simulation nur vereinfacht über den Reibfaktor abgebildet werden. Die

geringe Unterschätzung ist unkritisch, da die Prozesskräfte in diesem Stadium im Vergleich zu den Prozesskraftmaxima deutlich geringer sind.

Zur Auswahl des Umformequipments sind die maximal auftretenden Kräfte von Relevanz [185]. Die experimentell gemessenen Maxima von $152,8 \pm 0,8$ kN (ZR3) und $163,8 \pm 0,7$ kN (ZR13) werden durch die Simulation präzise vorhergesagt (Bild 25b). Die prozentuale Abweichung beträgt 2,3 % (156,8 kN) für die Geradverzahnung und 0,1 % (163,9 kN) für die Schrägverzahnung.

Der Vergleich der Ergebnisse aus dem Experiment und der Simulation beider Zahnradprozesse zeigt eine qualitativ hochwertige Vorhersagegenauigkeit der entwickelten FE-Modelle. Daher sind diese innerhalb numerischer Untersuchungen nutzbar, um das Prozessverständnis zu verbessern und vorteilhafte Methoden zur Beeinflussung des Prozessergebnisses beim Kaltfließpressen von Zahnrädern im „Samanta“-Verfahren zu erforschen.

6 Ermittlung von Wirkzusammenhängen zwischen Zahnradparametern und Prozessgrößen

Für die Erarbeitung eines grundlegenden Prozessverständnisses ist die Kenntnis über den Einfluss von Zahnradparametern, respektive der Zähnezahlsowie dem Modul und/oder Schrägungswinkel, auf die resultierenden Bauteil- und Prozesseigenschaften von besonderer Bedeutung. Auch sind davon abgeleitete Aussagen über die technologische Herstellbarkeit von Zahnradern im „Samanta“-Verfahren für den Anwender entscheidend.

6.1 Numerische Einflussanalyse und deren Ursachen

Der Einfluss der Zähnezahlsowie einer Variation von Modul und/oder Schrägungswinkel innerhalb des festgelegten Parameterraums (Bild 5) wird in numerischen Untersuchungen auf das Prozessergebnis ermittelt. Ferner werden die zugrundeliegenden Mechanismen durch physikalische Effekte und/oder Modellvorstellungen plausibilisiert. Die analysierten praxisrelevanten Bauteil- und Prozesseigenschaften fasst Bild 26 zusammen.

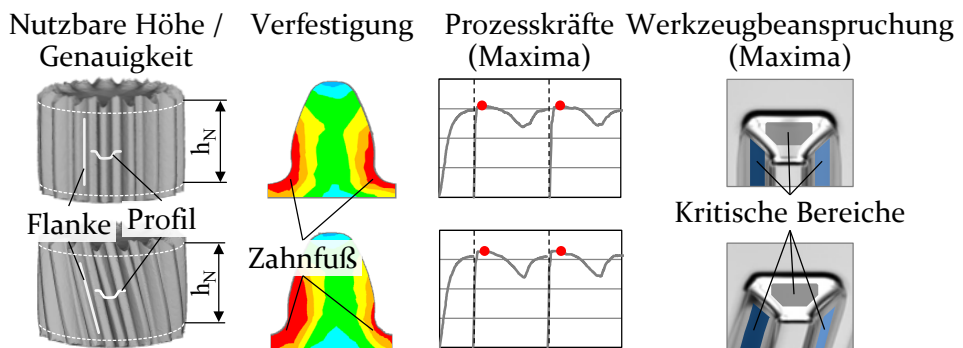


Bild 26: Untersuchte Bauteil- und Prozesseigenschaften

Bauteilseitig wurde die nutzbare Höhe h_N bestimmt, um Aussagen über die Materialeffizienz abzuleiten. Die Profil- und Flankenabweichung ist im Fokus der Untersuchungen, da diese entscheidende Parameter zur Bewertung der Verzahnungsgenauigkeit sind [181]. Weiterhin wurde die Umformgradverteilung im Verzahnungsbereich analysiert, um Rückschlüsse auf die mechanischen Eigenschaften hinsichtlich einer

möglichen Verfestigung der Zahnräder zu ziehen [21]. Dieser Bereich ist entscheidend für das Versagensverhalten von Zahnradern in Getriebeanwendungen [198]. Im Hinblick der Prozesseigenschaften wurden die maximalen Prozesskräfte ausgewertet, da diese entscheidend bei der Auswahl des Umformequipments sind und so auch die Energieeffizienz beeinflussen [185]. Ein weiteres wesentliches Prozesskriterium ist die auftretende maximale Werkzeugbeanspruchung. Hierzu wurden für die Verzahnungsmatrizen die versagenskritischen Spannungskomponenten $\sigma_{v.Mises}$, σ_{Max} und σ_{Min} in umformrelevanten Werkzeugbereichen analysiert, wobei fünf Matrizenzähne und jeweils fünf Knoten pro Bereich ausgewertet wurden.

6.1.1 Zähnezahl

Das Wissen über den Einfluss der Zähnezahl auf die Bauteil- und Prozesseigenschaften hinsichtlich Gemeinsamkeiten und Unterschieden ist für den Anwender im Zuge der Prozess-/Werkzeugauslegung entscheidend. Auf Basis der Referenzzahnradgeometrien (ZR₃ und ZR₁₃) wurde daher in numerischen Untersuchungen die Zähnezahl in fünf Stufen im Intervall von 16 bis 20 Zähnen variiert, wobei das Breiten-Durchmesser Verhältnis konstant 0,75 beträgt.

Bauteileigenschaften

Aus Bauteilsicht wurden hinsichtlich geometrischer Faktoren die nutzbare Höhe und die Verzahnungsgenauigkeit ermittelt. Zur Analyse der mechanischen Eigenschaften wurde die Umformgradverteilung im Zahnfußbereich betrachtet.

Nutzbare Höhe

Der Einfluss der Zähnezahl wurde auf die nutzbare Höhe h_N analysiert. Die Ergebnisse sind für beide Zahnräder in Bild 27 gegenübergestellt.

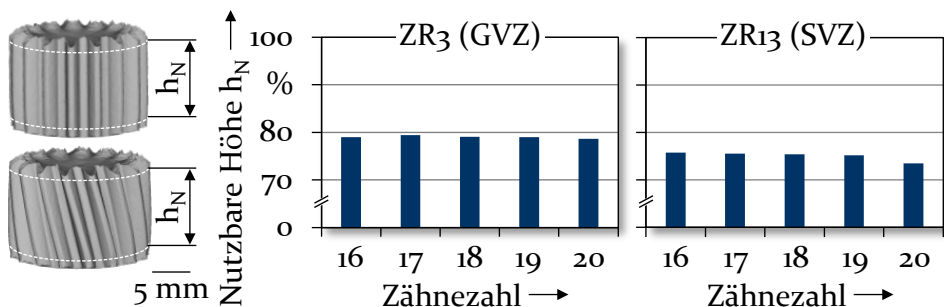


Bild 27: Einfluss Zähnezahl: Nutzbare Höhe h_N

Der nutzbare Bereich der Verzahnung beträgt im Fall der Geradverzahnung für 16 Zähne etwa 79 % und 78 % für 20 Zähne. Somit ist ein leichter Trend hinsichtlich einer Reduzierung zu erkennen. Für die Schrägverzahnung sinken die Werte mit steigender Zähnezah von etwa 76 % auf 73 %.

Eine Erklärung für die abnehmende Materialeffizienz mit steigender Zähnezah ist das veränderte integrale Verfestigungsniveau durch ein zunehmendes Bauteilvolumen im Mittenbereich. Dieser Zusammenhang ist in Bild 28 dargestellt.

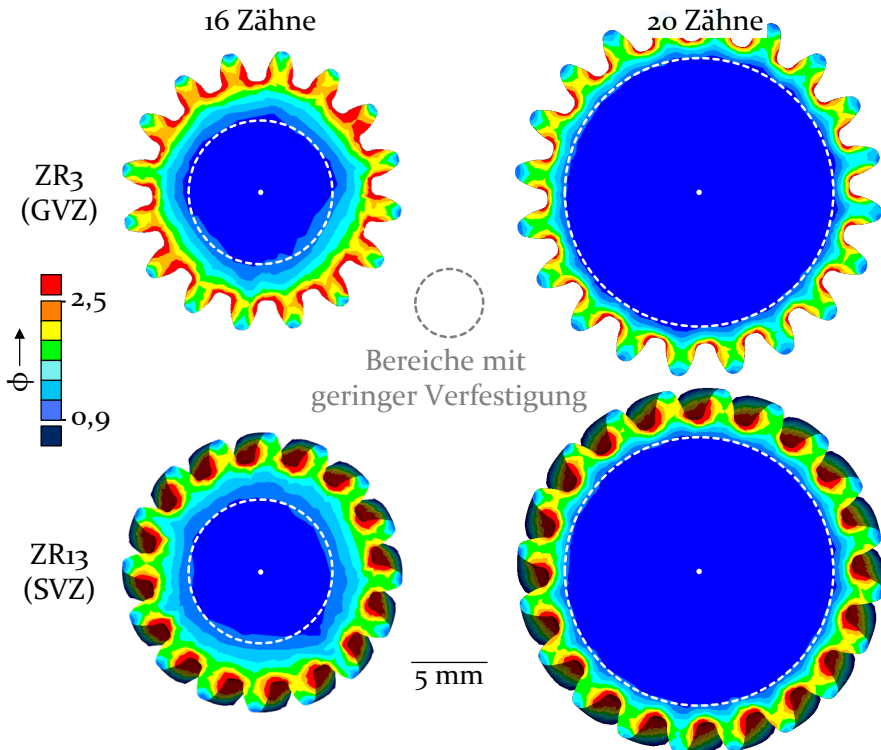


Bild 28: Einfluss Zähnezah: Umformgradverteilung (Querschnitt - qualitativ)

Die Ausformung von Verzahnungskonturen bedingt im Verzahnungsbereich und insbesondere in der randnahen Zone aufgrund der Materialumlenkung eine Verfestigung des Gefüges, wodurch dort deutliche höhere Umformgrade resultieren. Mit zunehmender Zähnezah steigt der Volumenanteil im Bauteilkern mit geringeren Umformgraden.

Um die Abnahme der Verfestigung für größere Bauteile infolge einer steigenden Zähnezah zu quantifizieren, wurden die Umformgrade im horizontalen Bauteilquerschnitt entlang eines Auswertepfades vom Randbereich bis zum Zentrum ausgewertet. Um einen direkten Vergleich

innerhalb der untersuchten Zähnezahlen zu ermöglichen, wurde der Auswertebereich entsprechend skaliert (Bild 29).

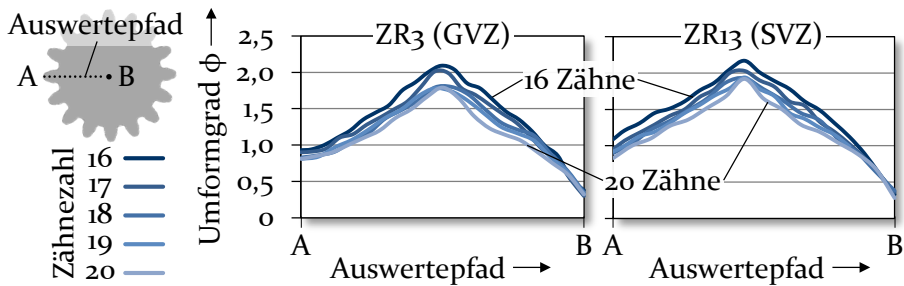


Bild 29: Einfluss Zähnezahl: Umformgradverteilung (Querschnitt)

Innerhalb der Verzahnungstypen ist für die betrachteten Zähnezahlen der Verlauf der Umformgrade über den Bauteilquerschnitt vergleichbar. Das absolute Niveau der Umformgrade ist für die Schrägverzahnungen etwas höher, da eine stärkere Materialumlenkung während der Umformung auftritt. Im Zahnkopfbereich treten für zunehmende Zähnezahlen etwas höhere Werte auf. Ausgehend von dieser Zone steigen die Werte im Mittel von etwa $\phi = 1,0$ auf $\phi = 1,7$ auf Höhe des Zahnfußbereichs an, wobei mit steigender Zähnezahl ein geringeres Niveau vorliegt. Aufgrund der geringen Materialumlenkung resultieren im Mittenbereich des Bauteilquerschnitts - unabhängig von der Zähnezahl - Umformgrade von $\phi = 0,4$.

Aus den Ergebnissen ist ableitbar, dass mit zunehmender Zähnezahl das integrale Verfestigungsniveau abnimmt und der Anteil an Zonen mit geringerer Verfestigung steigt. Dieser Effekt hat Auswirkungen auf den Stofffluss und reduziert die Materialeffizienz der Zahnräder (Bild 30).

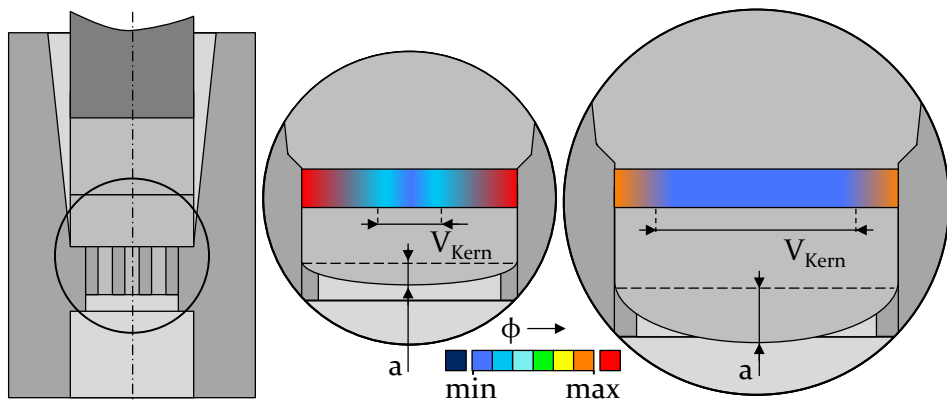


Bild 30: Modellvorstellung: Schematischer Materialfluss während der Umformung in Abhängigkeit der Zahnradgröße

Grundsätzlich bedingt das Vorwärtsfließpressen von Verzahnungen durch das Abbremsen des Materials in den Kavitätsbereichen ein Voreilen des Stoffflusses im Mittenbereich der Bauteile (Bild 13). Der Anstieg des Volumenanteils im Bauteilkern (V_{Kern}) mit einer geringeren Verfestigung verstärkt den Effekt. Während der Umformung wird ein Materialfluss im Mittenbereich begünstigt (a), wodurch die Einlaufzone an den Zahnradern vergrößert und die nutzbare Höhe h_N reduziert wird.

Verzahnungsgenauigkeit

Die Auswirkungen einer steigenden Zähnezahls auf die Verzahnungsgenauigkeit wurden in Bezug auf die Profilabweichung und den resultierenden Flankenwinkel ermittelt. Die Ergebnisse zeigt Bild 31.

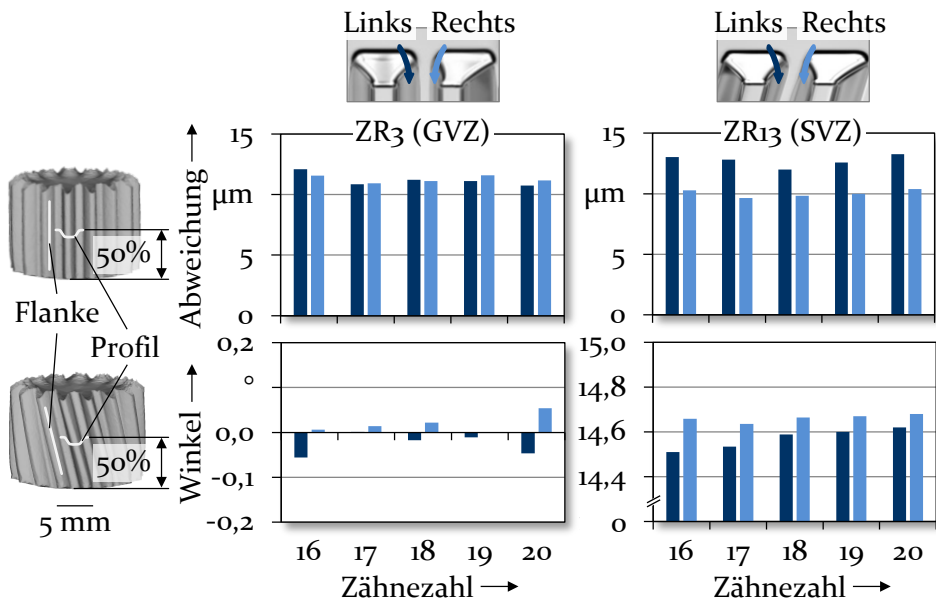


Bild 31: Einfluss Zähnezahls: Verzahnungsgenauigkeit

Im Fall der Geradverzahnung liegt für die Profilabweichung unabhängig von der Zähnezahls eine symmetrische Verteilung der Werte innerhalb beider Zahnseiten vor und beträgt im Mittel $11 \mu\text{m}$. Somit besitzt die Zähnezahls keinen wesentlichen Einfluss. Für die schrägverzahnnten Zahnradern bedingt die Materialflussumlenkung in der Verzahnungseinlaufzone eine asymmetrische Verteilung der Werte. Die Zähnezahls beeinflusst auch in diesem Fall die Werte nicht merklich und es werden innerhalb beider Zahnseiten etwa $11 \mu\text{m}$ erzielt. Grund für die nahezu konstanten Abweichungen im untersuchten Intervall der Zähnezahls sind die unveränder-

ten Bedingungen für den Stofffluss im Bereich der Verzahnungskavitäten, wodurch das Formfüllungsverhalten der Zahnkontur vergleichbar ist.

Mit Blick auf den Flankenwinkel schwanken die Werte für die geradverzahnten Zahnräder unabhängig von der Zähnezahl um 0° . Grundsätzlich wird für die Schrägverzahnung der vorgegebene Schrägungswinkel von 15° nicht erreicht. Dies ist durch das elastische Verhalten der Zahnräder beim Austritt auf dem Verzahnungsbereich zu erklären, wodurch die Maßhaltigkeit beeinträchtigt wird [191]. Mit zunehmender Zähnezahl ist ein leichter Anstieg der Winkel im Mittel von $14,6^\circ$ auf $14,7^\circ$ zu erkennen. Eine Erklärung hierfür ist, dass das abweichende Verfestigungsniveau der Zahnräder für unterschiedliche Zähnezahlen das Rückfederungsverhalten der Zahnflanken beeinflusst.

Verfestigung (Zahnfuß)

Um Rückschlüsse auf die Verfestigung der Zahnräder im versagensrelevanten Verzahnungsbereich zu ziehen, wurde die Umformgradverteilung im Zahnfußbereich der Bauteile analysiert [21]. Die Ergebnisse sind in Bild 32 für beide Verzahnungstypen gegenübergestellt.

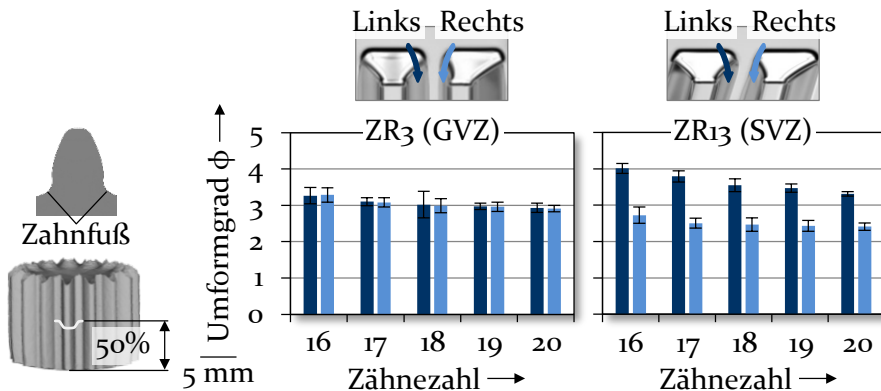


Bild 32: Einfluss Zähnezahl: Umformgradverteilung (Zahnfuß)

Für die Geradverzahnung liegt eine symmetrische Verteilung der Umformgrade innerhalb beider Zahnseiten vor. Mit zunehmender Zähnezahl ist eine Abnahme der Umformgrade von etwa $\phi = 3,3$ auf $\phi = 2,9$ zu erkennen. Die Ausformung einer Schrägverzahnung bewirkt unterschiedliche Umformgrade auf der linken und rechten Zahnseite. Auch hier nimmt das Verfestigungsniveau für eine größere Zähnezahl im Mittel beider Zahnseiten von $\phi = 3,4$ auf $\phi = 2,9$ ab. Eine Erklärung ist das geringer werdende Verhältnis von Verzahnungsbereich zu Bauteilkern mit zunehmender Zähnezahl (Bild 28). Dies begünstigt eine homogenere

Verteilung und einen Abbau der auftretenden Spannungen während des Kaltfließpressens, wodurch die Umformgrade sinken.

Prozesseigenschaften

Zur Ermittlung des Einflusses der Zähnezahl auf die Prozesseigenschaften wurden die erforderlichen Prozesskräfte analysiert. Zudem wurde die auftretende Werkzeugbeanspruchung in der Umformzone der Matrizen untersucht.

Prozesskräfte

Die Prozesskräfte wurden in Bezug auf die maximalen, relativen und die Kräfte je Zahn ausgewertet. Neben Maximalwerten wurde der Anteil der benötigten Stempelkraft und der Reibanteil berechnet (Bild 33).

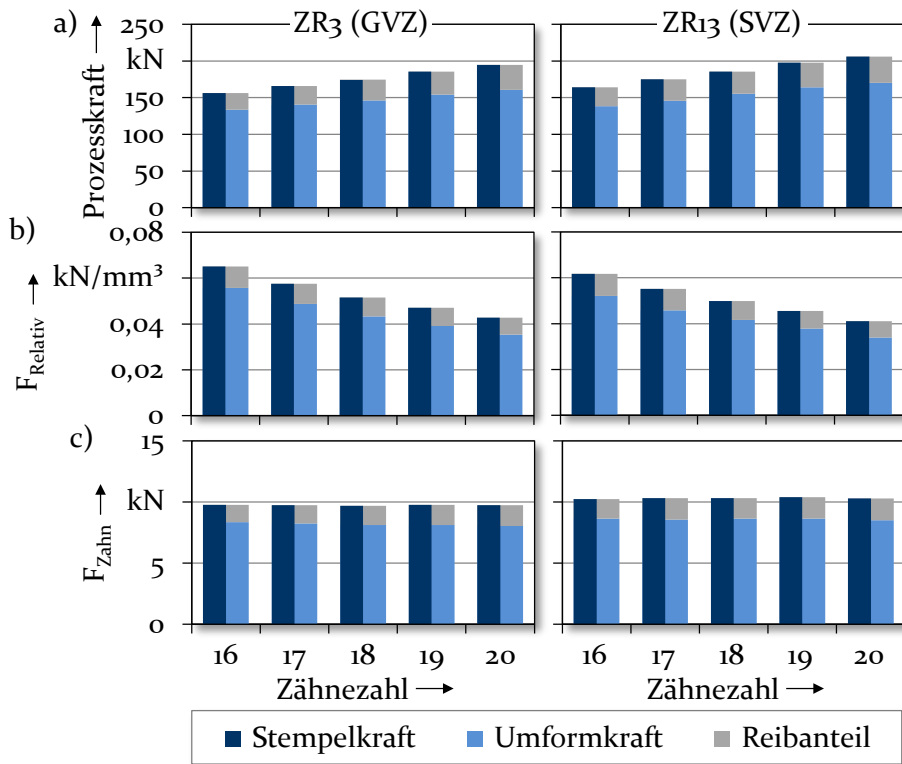


Bild 33: Einfluss Zähnezahl: Prozesskraft - a) maximal, b) relativ c) je Zahn

Für beide Verzahnungsarten resultieren infolge steigender Zähnezahlen respektive Bauteilgröße höhere maximale Prozesskräfte [199] (Bild 33a). Das etwas höher liegende Niveau der schrägverzahnten Zahnräder resultiert aufgrund des vergleichsweise größeren Bauteilvolumens infolge der

zahnradspezifischen Geometriezusammenhänge (Bild 5). Im Fall der Geradverzahnung steigt das Prozesskraftmaximum um rund 25 % von 156,3 kN auf 194,6 kN und von 163,9 kN auf 206,1 kN um etwa 26 % für die Schrägverzahnung. Neben größeren Bauteilvolumina bewirkt eine größere Kontakt- und damit Reibfläche für größere Zähnezahlen eine Zunahme der Kräfte [49]. Dieser Effekt ist für beide Verzahnungsarten durch den steigenden Reibanteil an der Gesamtkraft innerhalb der untersuchten Zähnezahlen erkennbar.

Die Berechnung der relativen Prozesskräfte F_{Relativ} ermöglicht eine volumenunabhängige Bewertung des erforderlichen Kraftbedarfs. In diesem Fall ist für beide Verzahnungsarten eine Reduzierung um etwa 34 % für F_{Relativ} ersichtlich (Bild 33b). Die Abnahme ist durch das geringere integrale Verfestigungsniveau zu erklären, wonach für größere Zähnezahlen der Anteil an Zonen mit vergleichsweise geringerer Verfestigung zunimmt (Bild 28). Der Reibanteil an der Gesamtkraft wird aufgrund steigender Reibflächen für größere Zähnezahlen erhöht.

Zur Ableitung von Aussagen über die auftretende Werkzeugbeanspruchung der Matrizenzähne wurden die Kräfte je Zahn bestimmt (Bild 33c). F_{Zahn} stellt somit den Quotienten aus maximaler Prozesskraft und Zähnezahl dar. Innerhalb der Verzahnungsarten ist zu erkennen, dass auf den Matrizenzahn wirkende Kräfte unabhängig von der Zähnezahl auf einem vergleichbaren Niveau von rund 10 kN liegen.

Werkzeugbeanspruchung

Der quantitative Einfluss der Zähnezahl auf die Werkzeugbeanspruchung in der Umformzone der gerad- und schrägverzahnten Matrizen wurde für versagensrelevante Spannungskomponenten ermittelt. Die Ergebnisse sind in Bild 34 zusammengefasst.

Die Herstellung von Verzahnungen bedingt im Schulterbereich der Verzahnungsmatrizen Spannungskonzentrationen. In dieser Zone treten Spannungswerte hinsichtlich $\sigma_{v.Mises}$ im Bereich von 2.000 MPa auf. Im Fall der Geradverzahnung liegt in den Seitenbereichen der Matrizenzähne eine symmetrische Spannungsverteilung vor, wohingegen die Ausformung einer Schrägverzahnung eine asymmetrische Verteilung bewirkt. Im untersuchten Intervall der Zähnezahlen ist kein wesentlicher Einfluss auf die auftretende Beanspruchungssituation der Werkzeuge zu erkennen. Eine Erklärung für die nahezu konstante Beanspruchung ist das vergleichbar wirkende Kraftniveau je Matrizenzahn während der Umformung.

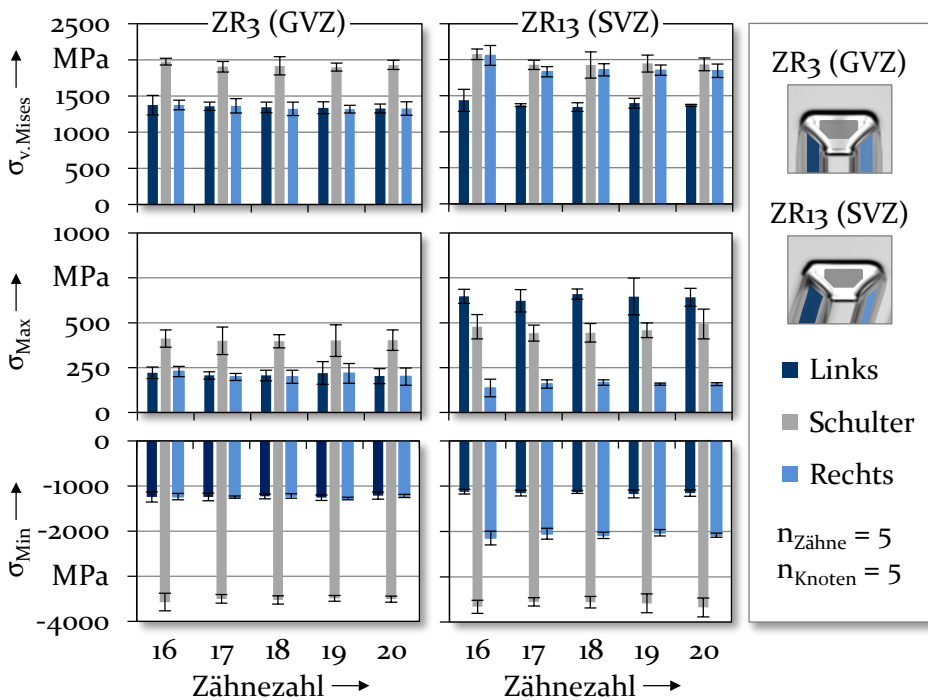


Bild 34: Einfluss Zähnezahzahl: Werkzeugbeanspruchung (maximal)

Durch den Werkstoffdruck auf die Matrizenähne wird ein Biegemoment im Schulterbereich initiiert, wodurch Zugspannungen (σ_{Max}) im Bereich von 400 MPa entstehen. Die Spannungsverteilung in den Seitenbereichen ist im Fall der Geradverzahnung symmetrisch mit Werten im Bereich von 220 MPa. Die Herstellung von Schrägverzahnung bewirkt durch den seitlichen Werkstoffdruck auf den Matrizenzahn Zugspannungen im linken Seitenbereich von etwa 620 MPa. Die Zugbeanspruchung der Werkzeuge bleibt unabhängig von Zähnezahzahl auf einem vergleichbaren Niveau. Hintergrund sind die konstant auftretenden Belastungen der Matrizenähne im untersuchten Intervall der Zähnezahzahl.

Die Ausformung von Verzahnungskonturen bedingt eine ausgeprägte Druckbeanspruchung (σ_{Min}) im Schulterbereich der Matrizenähne mit Spannungswerten von rund -3.500 MPa. Für die geradverzahnten Matrizen resultiert im Seitenbereich eine symmetrische Verteilung der Druckspannung von etwa -1.250 MPa. Im Fall der Schrägverzahnung drückt der Werkstofffluss auf die linke Seitenfläche des Matrizenzahns wodurch dieser im rechten Seitenbereich gestaucht wird. Dies bewirkt Druckspannungen in dieser Zone von etwa -2.100 MPa im Vergleich zu etwa -1.250 MPa auf der gegenüberliegenden Seite. Für die untersuchten

Zähnezahlen tritt innerhalb beider Verzahnungsarten ein vergleichbares Druckbeanspruchungsniveau der Matrizenzähne auf. Somit ist die auftretende Druckbeanspruchung unabhängig von Zähnezahl, was auf die nahezu konstant wirkende Kraft je Matrizenzahn zurückzuführen ist.

6.1.2 Modul und Schrägungswinkel

Neben der Zähnezahl ist die Kenntnis über den Einfluss von Modul und Schrägungswinkel, als wesentliche Gestaltungsparameter, auf das Prozessergebnis von Bedeutung. Insbesondere stehen Erkenntnisse hinsichtlich der resultierenden Bauteil- und Prozesseigenschaften innerhalb der verschiedenen Zahnradtypen sowie deren zugrundeliegenden Mechanismen im Vordergrund. Die beiden Parameter werden hierfür in fünf Stufen untersucht, wobei der Modul von 0,5 bis 1,5 mm und der Schrägungswinkel von 0° bis 30° variiert werden. Das Breiten-Durchmesser Verhältnis der Zahnäder beträgt durchgehend 0,75.

Bauteileigenschaften

Der Einfluss der untersuchten Zahnradmoduln/-schrägungswinkel wurde bauteilseitig auf die nutzbare Höhe h_N und die Verzahnungsgenauigkeit analysiert. Um Erkenntnisse über die mechanischen Eigenschaften zu erlangen, wurde die Umformgradverteilung näher betrachtet.

Nutzbare Höhe

Zur Ermittlung von Auswirkungen einer Variation von Modul und Schrägungswinkel auf die Materialeffizienz wurden die nutzbaren Bereiche der Verzahnungen bestimmt. Die Ergebnisse sind in Bild 35 dargestellt.

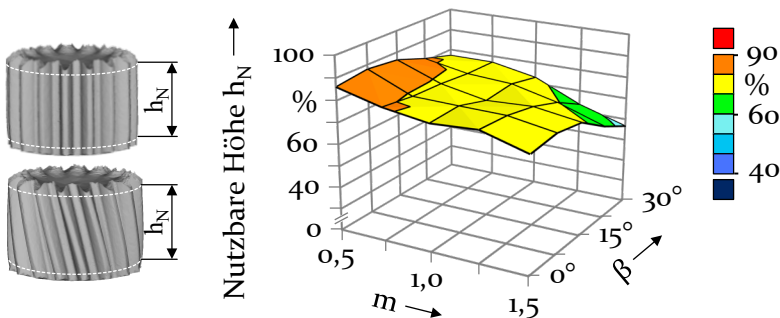


Bild 35: Einfluss Modul und Schrägungswinkel: Nutzbare Höhe h_N

Für größere Zahnradmoduln ist eine Abnahme des nutzbaren Verzahnungsbereichs feststellbar. Im Fall der Geradverzahnungen ($\beta = 0^\circ$) ist eine Reduzierung der Werte von etwa 86 % auf 73 % zu erkennen. Die

Umformung des Materials bedingt in den Verzahnungskavitäten und insbesondere im randnahen Bereich der Bauteile eine Gefügeverzerrung und folglich eine Verfestigung (Bild 36).

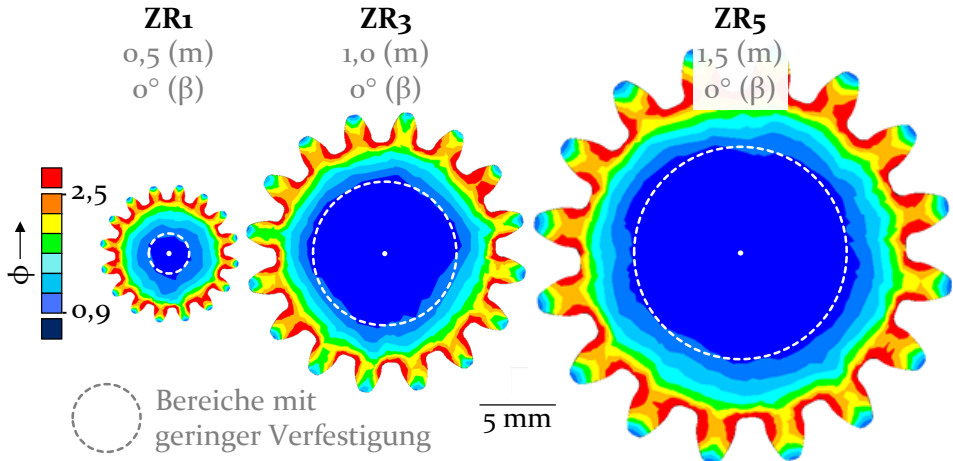


Bild 36: Einfluss Modul: Umformgradverteilung (Querschnitt - qualitativ)

Mit zunehmenden Moduln, respektive Bauteilgröße, nimmt der Materialanteil im Bauteilmittbereich zu, welcher gegenüber dem Verzahnungsbereich geringere Umformgrade aufweist. Während der Umformung wird durch diesen Effekt ein Materialfluss im Mittbereich der Bauteile begünstigt, wodurch die Einlaufzone an den Zahnrädern vergrößert und die nutzbare Höhe h_N reduziert wird. Dieser Zusammenhang ist vergleichbar mit den Erkenntnissen hinsichtlich des Einflusses der Zähnezah auf die Umformgrade. Mit zunehmender Zähnezah und damit Bauteilgröße nimmt der Anteil an Zonen - insbesondere im Bauteilkern - mit geringeren Umformgraden zu, wodurch das Verfestigungsniveau niedriger ist und ein Voreilen des Materialflusses im Mittbereich begünstigt wird (Bild 30).

Die Erhöhung des Schrägungswinkels bis zu einem Wert von 15° besitzt unabhängig vom Modul keinen wesentlichen Einfluss. Für größere Winkel ist eine Reduzierung der nutzbaren Höhe h_N zu erkennen. Eine Erklärung hierfür ist, dass durch die Ausformung einer Schrägverzahnung der Materialfluss in die Verzahnungskavitäten erschwert und in den Mittbereich der Bauteile begünstigt wird. Weiterhin ist erkennbar, dass für Flankenwinkel ab 15° der Moduleinfluss steigt, wonach größere Moduln den Effekt einer Reduzierung der nutzbaren Höhe h_N verstärken. Eine mögliche Erklärung ist eine geringere Flankengenauigkeit für zunehmende Moduln, welche Einfluss auf den funktionsfähigen Verzahnungsanteil

besitzt und diesen begrenzt. Beispielsweise wird für den nutzbaren Anteil bei konstantem Modul von $m = 1,5 \text{ mm}$ für unterschiedliche Flankenwinkel ein Wert von 73 % ($\beta = 0^\circ$), 72 % ($\beta = 15^\circ$) und 57 % ($\beta = 30^\circ$) erreicht.

Verzahnungsgenauigkeit

Die Verzahnungsgenauigkeit wurde durch die Ermittlung der Profilabweichung und des Flankenwinkels bewertet. Im Hinblick der Profilabweichung für die linke und rechte Zahnseite ist in Bild 37 der Einfluss von Modul und Schrägungswinkel gegenübergestellt.

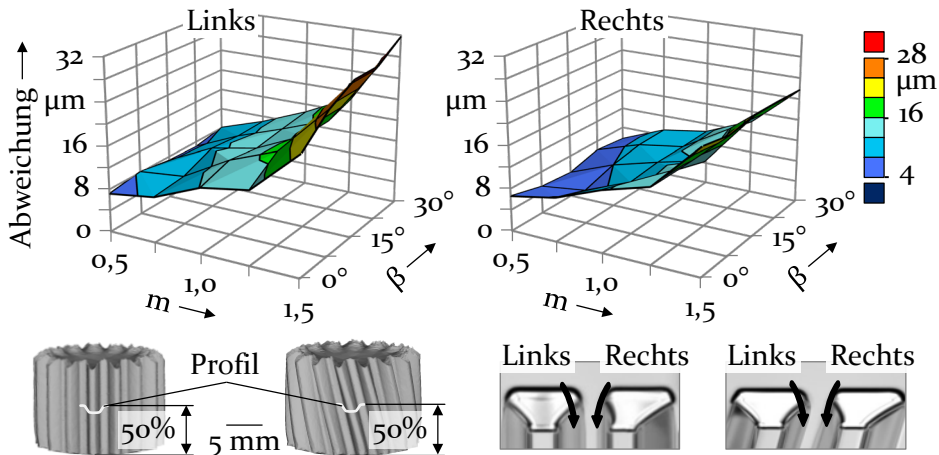


Bild 37: Einfluss Modul und Schrägungswinkel: Profilabweichung

Die Profilabweichung wird im Fall der Geradverzahnung ($\beta = 0^\circ$) für beide Zahnseiten innerhalb der untersuchten Zahnradmoduln von etwa $7 \mu\text{m}$ auf $22 \mu\text{m}$ erhöht, wobei eine symmetrische Verteilung der Werte vorliegt. Der Anstieg der Abweichung ist durch die zunehmende Bauteilgröße infolge steigender Moduln begründbar. Auch sind längere Fließ- und Gleitwege des Werkstoffs während der Umformung ein Einflussfaktor auf die Formgenauigkeit.

Der Schrägungswinkel besitzt im Vergleich zum Modul einen geringeren Einfluss auf die Erhöhung der Werte für die Profilabweichung. Für größere Flankenwinkel wird der Materialfluss in der Umformzone stärker umgelenkt, wodurch das Niveau der Werte auf der linken Zahnseite höher liegt und eine asymmetrische Eigenschaftsverteilung bedingt. Im Extremfall liegt für einen Modul von $m = 1,5 \text{ mm}$ und Schrägungswinkel von $\beta = 30^\circ$ ein Unterschied von über 30 % innerhalb der Werte für die linke und rechte Zahnseite vor.

Auswirkungen der untersuchten Zahnradparameter wurden auf die absolute Abweichung des Flankenwinkels ermittelt. Die Ergebnisse sind in Bild 38 gezeigt.

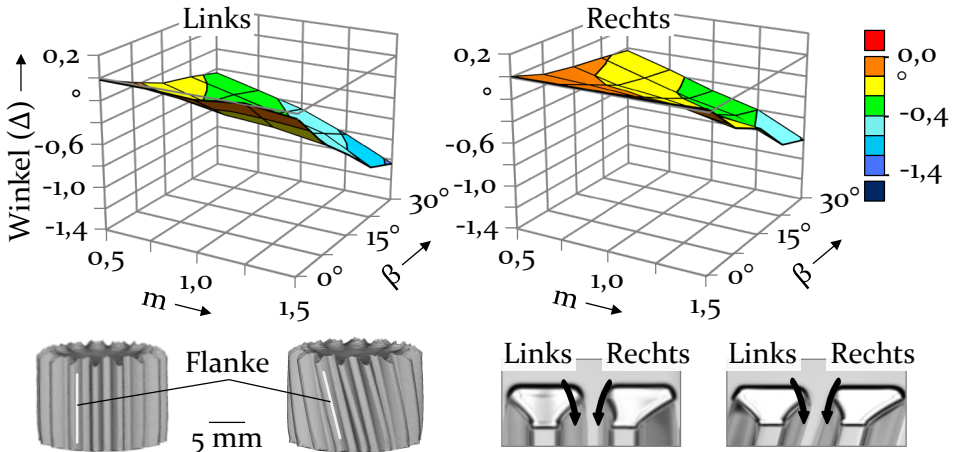


Bild 38: Einfluss Modul und Schrägungswinkel: Schrägungswinkel (Abweichung absolut)

Für die hergestellten Geradverzahnungen ($\beta = 0^\circ$) treten unabhängig vom Modul geringe Abweichungen mit Werten um 0° auf. Wird im Fall von Schrägverzahnungen der Modul erhöht, so nehmen die Abweichungen vom Winkel zu. Beispielsweise beträgt im Mittel beider Zahnseiten bei gleichem Schrägungswinkel ($\beta = 30^\circ$) für einen Modul von $m = 0,5$ mm die Abweichung $-0,34^\circ$ und $-0,93^\circ$ für $m = 1,5$ mm. Grundsätzlich tritt durch die Materialumformung im Bereich der Verzahnung eine Verfestigung auf. Durch größere Moduln nehmen die Bauteilgröße und der Anteil an Zonen im Verzahnungsquerschnitt mit geringer Verfestigung zu. Dies besitzt Einfluss auf das elastische Rückfederungsverhalten der Zahnkonturen am Bauteil, wodurch der Anstieg der Winkelabweichungen für eine zunehmende Modulgröße zu erklären ist. Einen weiteren möglichen Einfluss auf die Ausformung des Flankenwinkels besitzen die längeren Fließ- und Gleitwege des Werkstoffs mit steigender Bauteilgröße.

Auch werden mit steigendem Flankenwinkel auftretende Winkelabweichungen vergrößert. Eine Erklärung hierfür ist, dass mit größeren Schrägungswinkeln besondere Anforderungen an den auftretenden Materialfluss aufgrund einer stärkeren Umlenkung in der Umformzone gestellt werden. Die auftretende Stoffflussumlenkung für Schrägverzahnungen bewirkt grundsätzlich die Ausbildung asymmetrischer Eigenschaften, wodurch auf der linken Zahnseite das Niveau der Winkelabweichungen höher liegt. Dieser Effekt wird bei größeren Flankenwinkeln verstärkt.

Neben der absoluten wurde die relative Abweichung vom Schrägungswinkel berechnet. Das Ergebnis ist in Bild 39 getrennt für die linke und rechte Zahnseite dargestellt.

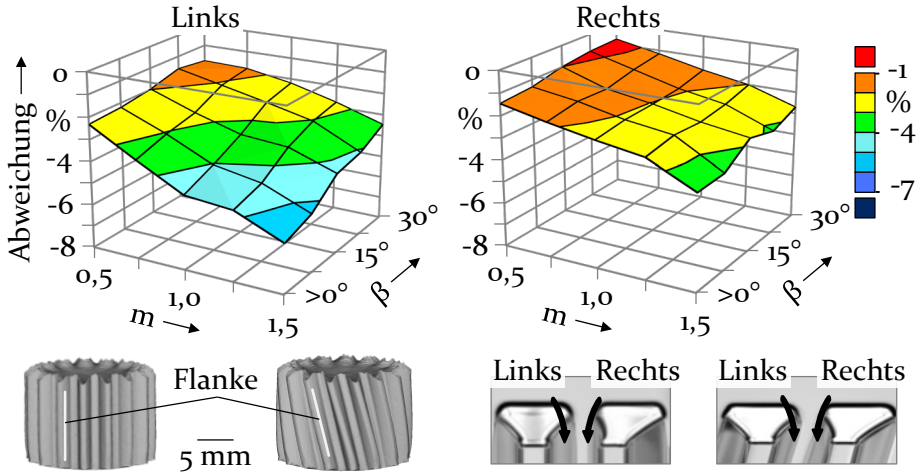


Bild 39: Einfluss Modul und Schrägungswinkel: Schrägungswinkel (Abweichung relativ)

Die Auswertung in Bezug auf die relative Winkelabweichung für beide Zahnseiten zeigt, dass infolge zunehmender Moduln die prozentuale Abweichung vom geforderten Flankenwinkel zunimmt und bestätigt den identifizierten Zusammenhang für die absolute Abweichung. Im Mittel der linken und rechten Zahnseite tritt eine relative Abweichung von rund - 2 % ($m = 0,5$ mm), - 4 % ($m = 1,0$ mm) und - 5 % ($m = 1,5$ mm) auf. Im Gegensatz dazu liegen für größere Flankenwinkel niedrigere relative Abweichungen vor. Somit besteht kein direkter Zusammenhang zwischen absoluter und relativer Winkelabweichung. Dieser Effekt wird durch die Überlagerung des spezifischen werkstück- und werkzeugseitigen Deformationsverhaltens beeinflusst und begründet.

Das Niveau der prozentualen Abweichung ist - analog zur absoluten Abweichung - im Fall der linken Zahnseite etwas höher, was auf die auftretende Stoffflussumlenkung in der Umformzone und die resultierende negative Beeinflussung der erzielbaren Formgenauigkeit zurückzuführen ist. Für Geradverzahnungen ($\beta = 0^\circ$) ist insgesamt eine hohe Flankengenauigkeit realisierbar, wodurch die relative Abweichung Werte um 0 % besitzt. Dies ist durch die vergleichsweise geringere Umlenkung des Materialflusses im Verzahnungseinlaufbereich während der Umformung zu erklären.

Verfestigung (Zahnfuß)

Um Rückschlüsse über eine Bauteilverfestigung zu erhalten, wurde die Umformgradverteilung im Zahnfußbereich für die linke und rechte Zahnseite bestimmt. Die Ergebnisse werden in Bild 40 visualisiert.

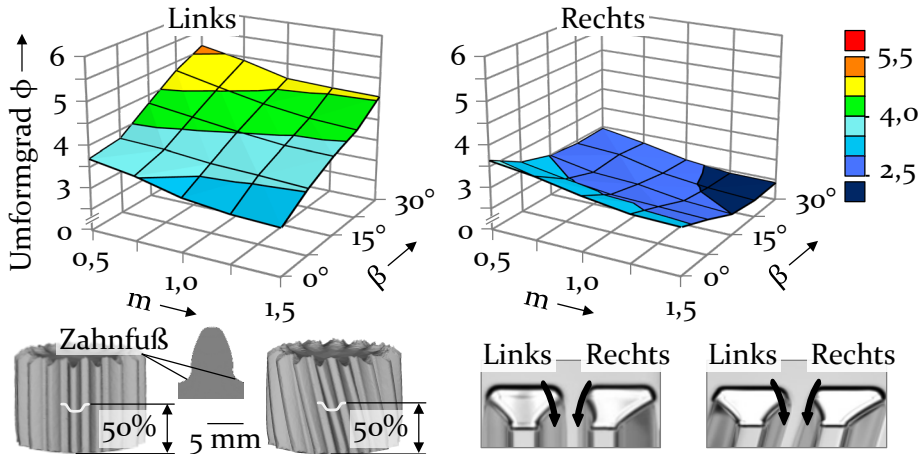


Bild 40: Einfluss Modul und Schrägungswinkel: Umformgradverteilung (Zahnfuß)

Für Geradverzahnungen ($\beta = 0^\circ$) liegt für die Umformgrade eine symmetrische Verteilung innerhalb der linken und rechten Zahnseiten vor. In diesem Fall betragen die Umformgrade im Mittel $\phi = 3,7$ ($m = 0,5$ mm), $\phi = 3,3$ ($m = 1,0$ mm) und $\phi = 3,1$ ($m = 1,5$ mm). Mit einem Anstieg des Zahnradmoduls liegen die Umformgrade im Verzahnungsbereich auf einem vergleichbaren Niveau, jedoch mit tendenziell geringeren Werten für größere Moduln. Der Modul bestimmt die Zahngröße respektive Querschnittsfläche, wobei höhere Moduln die Fläche vergrößern. Durch die Umformung resultiert in den Verzahnungskavitäten und insbesondere im randnahen Bereich eine Verfestigung des Werkstoffes. Mit zunehmender Querschnittsfläche infolge einer Modulerhöhung resultieren geringere Deformationen des Werkstoffes und eine homogenere Verteilung der auftretenden Spannungen während der Umformung, wodurch die Reduzierung der Umformgrade für größere Moduln zu erklären ist.

Wird der Schrägungswinkel erhöht, so entsteht aufgrund der Umlenkung des Materialflusses in der Umformzone eine asymmetrische Verteilung der Umformgrade innerhalb der Zahnseiten. Dieser Effekt wird für zunehmende Flankenwinkel verstärkt. So tritt bei einem Modul von $m = 0,5$ und Schrägungswinkel von $\beta = 30^\circ$ ein Unterschied in den Umformgraden innerhalb beider Zahnseiten von über 40 % auf.

Prozesseigenschaften

Die untersuchten Zahnradparameter wurden hinsichtlich ihres Einflusses auf die Prozesseigenschaften in Bezug auf die Prozesskräfte untersucht. Auch wurden für versagensrelevante Werkzeugbereiche die auftretenden Spannungen analysiert.

Prozesskräfte

In Bezug auf die Prozesskräfte wurden neben der maximalen auch die relativen Kräfte berechnet. Die Ergebnisse fasst Bild 41 zusammen.

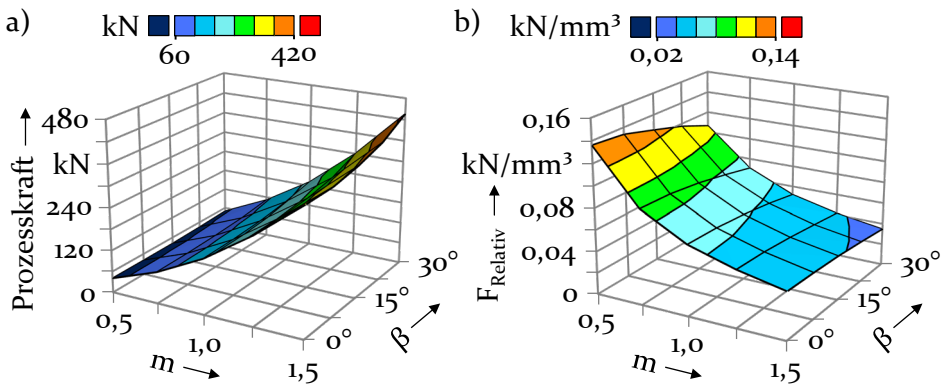


Bild 41: Einfluss Modul und Schrägungswinkel: Prozesskraft – a) maximal) und b) relativ

Mit zunehmendem Modul werden die maximal erforderlichen Prozesskräfte während der Umformung erhöht (Bild 41a). Im Fall der Geradverzahnung ($\beta = 0^\circ$) werden für unterschiedliche Moduln Prozesskräfte von 40,8 kN ($m = 0,5$ mm), 156,3 kN ($m = 1,0$ mm) und 353,4 kN ($m = 1,5$ mm) benötigt. Aufgrund der zahnradspezifischen Geometriezusammenhänge bedingen größere Moduln einen Anstieg der Bauteilgröße und damit des zu verdrängenden Volumens, wodurch die Erhöhung der Prozesskräfte begründet ist.

Auch wird für zunehmende Schrägungswinkel das Zahnradvolumen erhöht, wodurch höhere Prozesskräfte erforderlich sind. Beispielsweise treten innerhalb eines Moduls von $m = 1,0$ mm für unterschiedliche Flankenwinkel höhere Prozesskräfte mit 156,3 kN ($\beta = 0^\circ$), 163,9 kN ($\beta = 15^\circ$) und 192,2 kN ($\beta = 30^\circ$) auf.

Die Prozesskräfte sind eine wichtige Auslegungsgröße in der Umformtechnik und werden durch die Volumina der Bauteile beeinflusst. Deshalb erfolgt eine volumenunabhängige Bewertung der erforderlichen Kräfte. Hierzu wurden die relative Prozesskräfte F_{Relativ} berechnet (Bild 41b). Dieser Parameter stellt das Verhältnis des Zahnradvolumens der

Soll-Geometrie zur maximalen Prozesskraft dar (1). Für größere Zahnradmoduln nehmen die Werte für F_{Relativ} ab. Dies ist auf die Reduzierung des integralen Verfestigungsniveaus bei der Umformung größerer Zahnradmoduln zurückzuführen, da der Anteil an Bereichen mit geringer Verfestigung - insbesondere im Bauteilzentrum - zunimmt.

Für zunehmende Flankenwinkel ist eine leichte Reduzierung der relativen Prozesskräfte zu erkennen. Dieser Effekt ist darin begründet, dass im Fall von Geradverzahnungen durch eine symmetrische Umformzone eine größere Kontaktfläche mit dem in die Verzahnungskavität fließenden Material resultiert. Diese bedingt eine zunehmende Reibung und dadurch höhere Umformkräfte. Für Schrägverzahnungen liegt aufgrund der Materialflussumlenkung im Verzahnungseinlaufbereich eine geringere Kontakt- und dadurch Reibfläche vor.

Werkzeugbeanspruchung

Der quantitative Einfluss der Zahnradparameter auf die maximale Werkzeugbeanspruchung in der Umformzone der Matrizen wurde hinsichtlich $\sigma_{v.Mises}$, σ_{Max} und σ_{Min} ermittelt. Für die Einflussanalyse von Modul und Schrägungswinkel ist ein Rückgriff auf die in Bild 21 beschriebene, spezifische Beanspruchungssituation für gerad- und schrägverzahnte Matrizen während der Umformung möglich, um grundlegende Zusammenhänge verstehen und Erkenntnisse abzuleiten zu können. In Bild 42 sind die Ergebnisse für die Spannungskomponente $\sigma_{v.Mises}$ gezeigt.

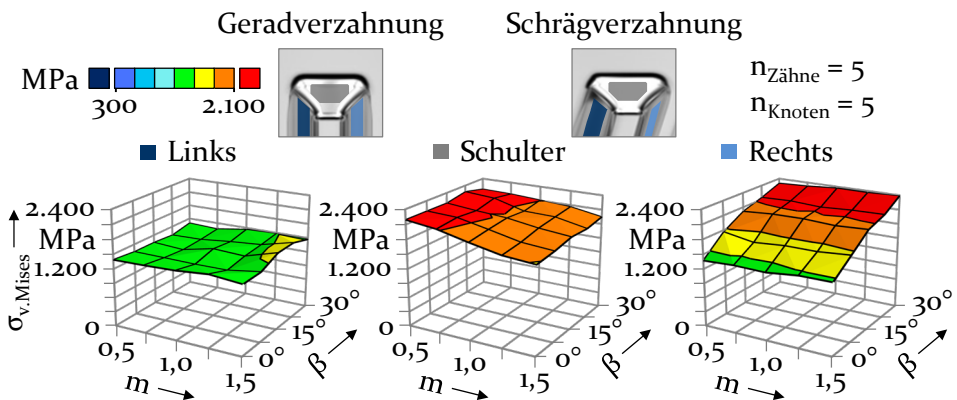


Bild 42: Einfluss Modul und Schrägungswinkel: Werkzeugbeanspruchung (maximal) – Vergleichsspannung nach von Mises ($\sigma_{v.Mises}$)

Im Fall der Geradverzahnung ($\beta = 0^\circ$) liegt an den linken und rechten Seitenflächen der Matrizenzähne eine symmetrische Spannungsverteilung von etwa 1.400 MPa vor. Unabhängig von Modul und Schrägungswinkel

tritt im linken Seitenbereich ein nahezu konstantes Spannungsniveau mit Werten im Bereich von rund 1.400 MPa auf.

Im Schulterbereich der Matrize bewirkt der Materialfluss das Auftreten eines Biegemoments, wodurch lokale Spannungskonzentrationen induziert werden. Innerhalb des untersuchten Parameterraumes werden Spannungswerte von etwa 1.900 MPa bis 2.300 MPa erreicht. Für zunehmende Zahnradmoduln werden die Spannungen etwas reduziert. Dies ist auf die homogenere Spannungsverteilung und einen Spannungsabbau für größere Matrizenzahnvolumina zurückzuführen. Die Größe des Flankenwinkels hat keinen merklichen Einfluss auf das Spannungsniveau.

Die Ausformung eines Schrägungswinkels initiiert unabhängig von der Modulgröße im rechten Seitenbereich Spannungen und bedingt dadurch eine asymmetrische Werkzeugbeanspruchung. Für zunehmende Flankenwinkel werden Spannungswerte in diesem Bereich weiter erhöht. Für die untersuchten Moduln erreichen die Spannungen für drei unterschiedliche Winkel Werte im Bereich von 1.400 MPa ($\beta = 0^\circ$), 2.100 MPa ($\beta = 15^\circ$) und 2.400 MPa ($\beta = 30^\circ$).

Neben $\sigma_{v.Mises}$ wurden die maximalen Zug- und Druckspannungszustände in den umformrelevanten Bereichen der Matrizen analysiert. In Bild 43 sind die Ergebnisse hinsichtlich σ_{Max} für die untersuchten versagenskritischen Werkzeugbereiche dargestellt.

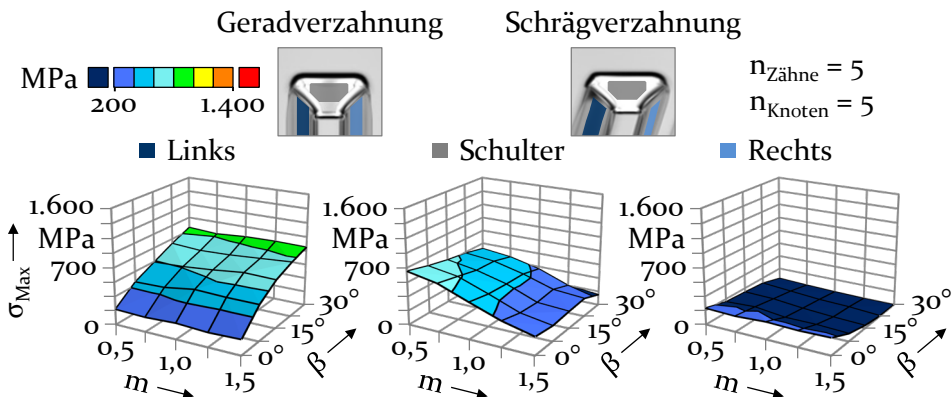


Bild 43: Einfluss Modul und Schrägungswinkel: Werkzeugbeanspruchung (maximal) - maximale Hauptspannung (σ_{Max})

Für geradverzahnte Matrizen ($\beta = 0^\circ$) treten an den Seitenflächen der Matrizenzähne vergleichbare Spannungswerte für σ_{Max} auf. Die Spannungen liegen unabhängig vom Modul im Bereich von 200 MPa. Im Fall von Schrägverzahnungen resultiert durch den Druck des Materialflusses auf

die linke Seitenfläche ein zunehmender Zugspannungsanteil. Mit zunehmendem Flankenwinkel wird dieser Effekt verstärkt, wobei der Modul keinen wesentlichen Einfluss besitzt. Für einen Winkel von $\beta = 30^\circ$ betragen die Spannungen für die untersuchten Moduln Werte von etwa 825 MPa.

Im Schulterbereich der Matrize bewirkt das auftretende Biegemoment eine Zugbeanspruchung. Ein zunehmender Zahnradmodul begünstigt den Abbau von auftretenden Spannungen, wodurch die Werte von circa 700 MPa auf 150 MPa reduziert werden. Der Flankenwinkel besitzt keine wesentlichen Auswirkungen auf das Zugspannungsniveau.

Im rechten Seitenbereich der Matrizenzähne tritt eine relativ konstante Zugbeanspruchung auf. Zugspannungen betragen innerhalb des untersuchten Parameterraumes im Mittel etwa 100 MPa.

Auch wird der Einfluss von Modul und Schrägungswinkel auf den resultierenden Druckspannungszustand (σ_{Min}) in der Umformzone der Matrizen untersucht. Bild 44 zeigt die Ergebnisse für die unterschiedlichen Werkzeugbereiche.

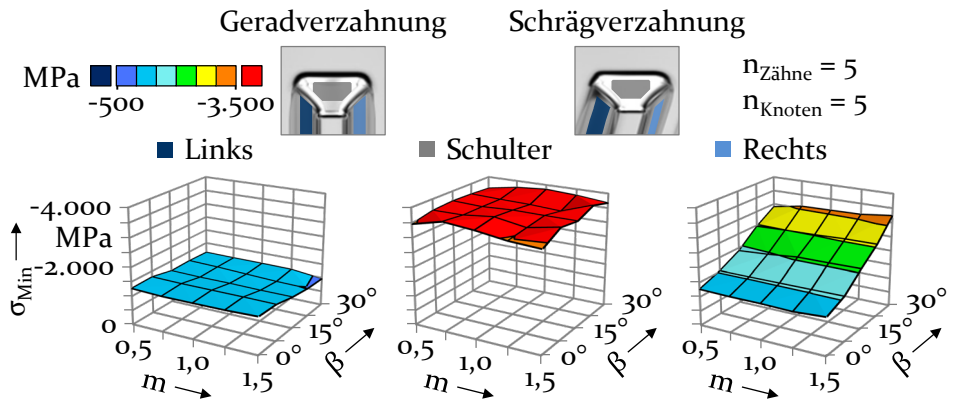


Bild 44: Einfluss Modul und Schrägungswinkel: Werkzeugbeanspruchung (maximal) - minimale Hauptspannung (σ_{Min})

Für Geradverzahnungen ($\beta = 0^\circ$) liegen im Bereich der linken und rechten Seitenflächen der Matrizenzähne vergleichbare Druckspannungswerte vor. In dieser Zone treten unabhängig von Modul und Flankenwinkel durch den Druck des Materials während der Umformung Spannungen von -1.250 MPa auf.

Die Ausformung von Verzahnungen bedingt im Allgemeinen ausgeprägte Druckbeanspruchungen in der Schulterzone der Matrizen. Dort werden

Spannungswerte von rund - 3.500 MPa erreicht, wobei der Modul und Schrägungswinkel keinen merklichen Einfluss besitzt.

Bei der Ausformung von Schrägverzahnungen drückt das Material auf die linke Seitenfläche wodurch im rechten Seitenbereich der Matrizen Zahn gestaucht wird und Druckspannungen in dieser Zone resultieren. Hierdurch wird eine asymmetrische Verteilung der Spannungswerte hervorgerufen. Für zunehmende Flankenwinkel werden auftretende Spannungen erhöht. Innerhalb der untersuchten Moduln treten für einen Winkel von $\beta = 15^\circ$ Druckspannungswerte von etwa - 2.000 MPa, wohingegen für $\beta = 30^\circ$ Werte im Bereich von - 3.000 MPa resultieren.

Wirkmechanismen der Zahnradparameter auf die Werkzeugbeanspruchung

Die auftretende Beanspruchungssituation von gerad- und schrägverzahn-ten Matrizen während der Umformung ist in Abhängigkeit von Modul und Schrägungswinkel durch zwei wesentliche Mechanismen geprägt. Beide Effekte werden in Bild 45 zusammengefasst.

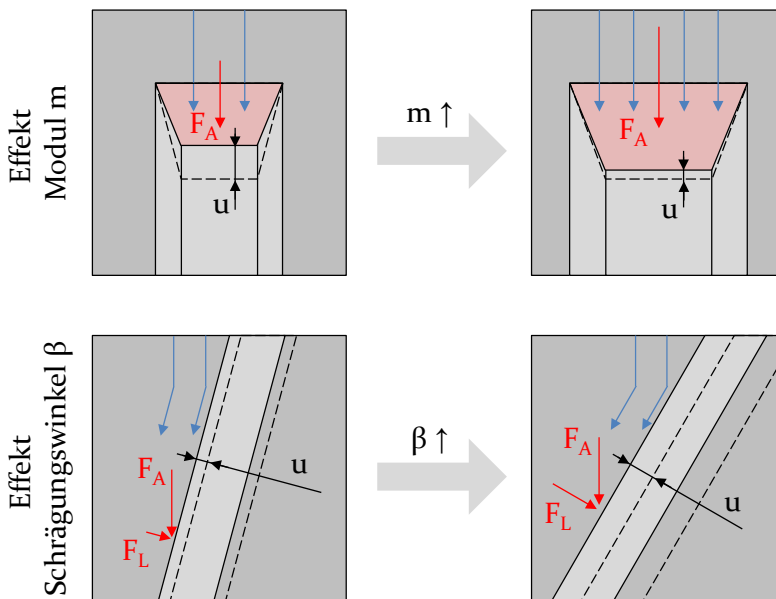


Bild 45: Modellvorstellung: Einfluss von Modul und Schrägungswinkel auf die Werkzeugbeanspruchung von gerad- und schrägverzahn-ten Matrizen während der Umformung

Während der Umformung wirkt durch den Werkstofffluss auf den exponierten Schulterbereich der Matrizen eine Kraft in axialer Richtung (F_A) und bewirkt eine Deformation (u). Für kleine Zahnradmodule, respektive Matrizenzähne, liegt eine geringe Querschnittsfläche in der Umformzone

vor. Wird der Modul (m) erhöht, wird auch diese Fläche vergrößert, was einen Spannungsabbau sowie eine geringere Deformation (u) begünstigt. Der Moduleffekt ist für gerad- und schrägverzahnte Matrizen vergleichbar.

Die Herstellung von Schrägverzahnungen bedingt neben einer axialen Kraft (F_A) eine laterale Kraft (F_L) auf die Seitenflächen der Matrizenzähne. Dieser seitliche Druck hat ebenfalls eine Deformation (u) zur Folge. Die Ausprägung dieser wird dabei wesentlich vom Schrägungswinkel β bestimmt. Ein zunehmender Flankenwinkel resultiert in einem größeren lateralen Kraftanteil (F_L), wodurch neben der Deformation (u) auch Zug- und Druckspannungen in den Seitenbereichen der Matrizenzähne erhöht werden.

6.2 Verifizierung der numerischen Erkenntnisse

Der experimentelle Nachweis der Erkenntnisse im Hinblick des Einflusses einer Variation von Modul und/oder Schrägungswinkel auf das resultierende Prozessergebnis erfolgt durch Umformversuche. Analog zur Prozessauslegung für das gerad- und schrägverzahnte Referenzzahnrad (ZR₃ und ZR₁₃) wurden die Prozesse der Zahnräder ZR₀₁, ZR₀₅, ZR₂₁ und ZR₂₅ aufgebaut. Für die hergestellten Zahnräder wurden die Bauteil- und Prozesseigenschaften charakterisiert.

Die Ergebnisse bilden zudem die Basis für die Ermittlung der Wirksamkeit vorteilhafter Methoden zur Prozessbeeinflussung. Dies erfolgt für die festgelegten Gerad- und Schrägverzahnungen und die unterschiedlichen Zahnradparameter.

Bauteileigenschaften

Der Einfluss von Modul und Schrägungswinkel wurde bauteilseitig in Bezug auf die Materialeffizienz und die Verzahnungsgenauigkeit ermittelt. Um die mechanischen Eigenschaften zu analysieren, wurde die Umformgradverteilung im Zahnfußbereich untersucht. Die Ergebnisse werden getrennt für die Stahlsorten 16MnCr5 und C15C betrachtet.

Nutzbare Höhe

Der Einfluss von Modul und Schrägungswinkel wurde für die untersuchten Zahnräder auf die nutzbare Höhe h_N ermittelt. Die Ergebnisse sind für beide Stahlsorten in Bild 46 dargestellt.

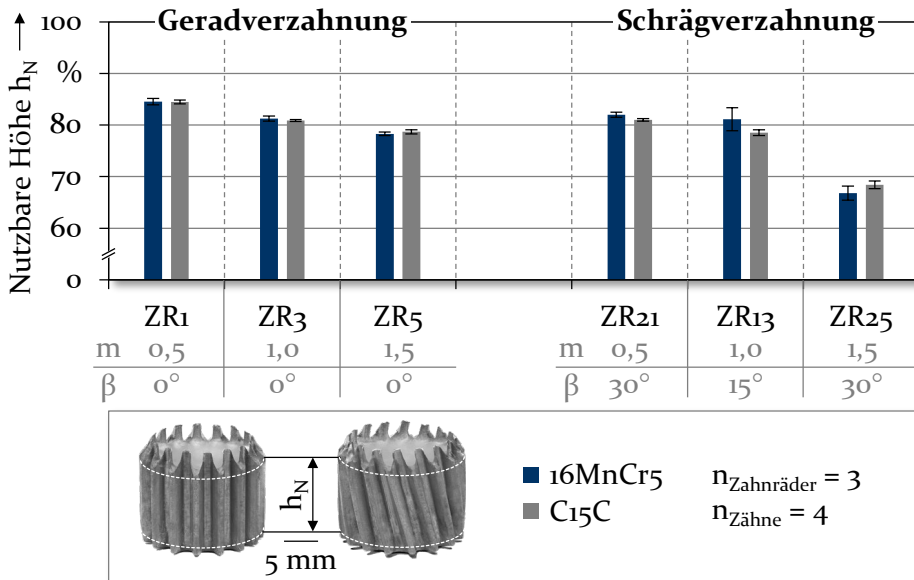


Bild 46: Einfluss Modul und Schrägungswinkel (experimentell): Nutzbare Höhe h_N

Für beide Verzahnungstypen wird der nutzbare Bereich der gerad- und schrägverzahnten Zahnräder mit zunehmendem Modul reduziert. Im Fall der Geradverzahnungen betragen für 16MnCr5 die Werte rund 85 % (ZR1), 81 % (ZR3) und 78 % (ZR5). Ein Grund für die Abnahme des nutzbaren Anteils infolge einer Modulzunahme ist der begünstigte Materialfluss im Mittenbereich der Zahnräder aufgrund des geringeren Verfestigungs-niveaus, wodurch die Einlaufzone vergrößert und der nutzbare Bereich reduziert wird (Bild 30).

Die Werte der Schrägverzahnungen liegen im Bereich von 82 % (ZR21), 81 % (ZR13) und 67 % (ZR25). Der Effekt des Voreilens des Materials wird bei der Ausformung einer Schrägverzahnung verstärkt, weshalb nutzbare Höhen geringere Werte erreichen. Eine Erklärung für die vergleichsweise niedrigen Werte von ZR25 ist, dass für dieses Zahnrad eine geringe Flanken- genauigkeit erreicht wurde und letztlich den funktionsfähigen Verzahnungsanteil begrenzt. Innerhalb der untersuchten Stahlsorten treten geringe Unterschiede auf, die durch das spezifische Festigkeits- verhalten der Werkstoffe erklärt werden.

Verzahnungsgenauigkeit

Die Bewertung der Verzahnungsgenauigkeit erfolgt durch die Ermittlung der Profil- und Flankenabweichung. Für die hergestellten geradverzahn- ten Zahnräder ist die Profilabweichung in Bild 47 zusammengefasst.

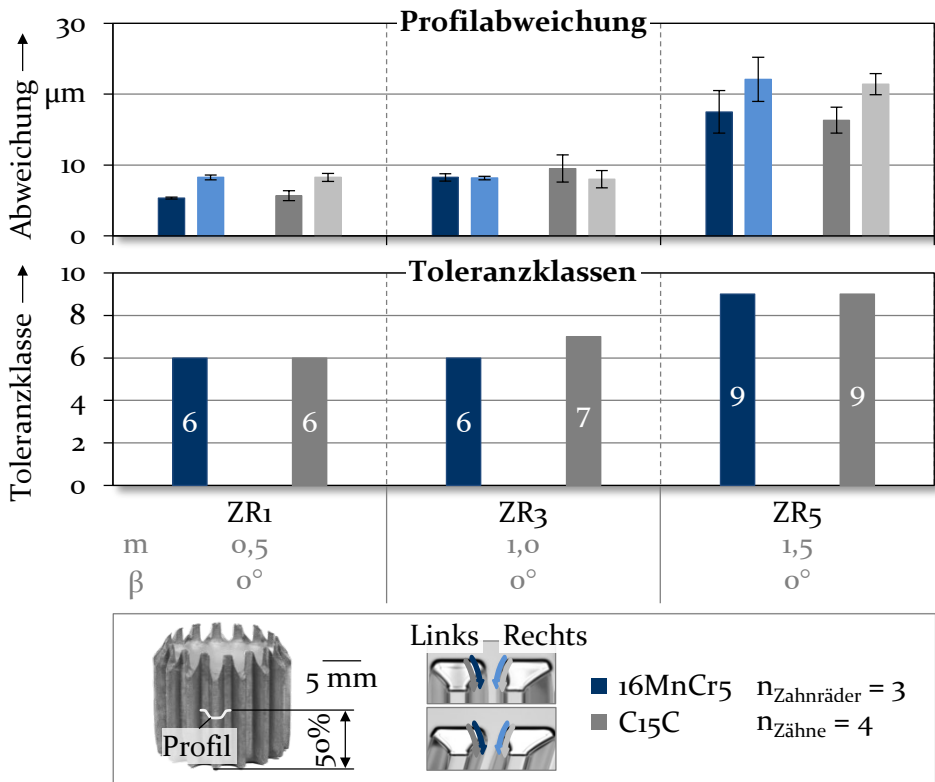


Bild 47: Einfluss Modul und Schrägungswinkel (experimentell): Profilabweichung (ZR₁, ZR₃ und ZR₅)

Für die geradverzahnten Zahnräder steigt mit dem zunehmenden Modul die Profilabweichung. Im Mittel werden Werte von 7 µm (ZR₁), 9 µm (ZR₃) und 19 µm (ZR₅) erzielt. Innerhalb der Stahlsorten treten keine wesentlichen Unterschiede auf. Bei ZR₁ und ZR₃ liegen die Werte im Bereich einer Toleranzklasse von 6 bis 7. Für bei ZR₅ wird eine Toleranzklasse von 9 für beide Stahlwerkstoffe erreicht.

Ein Grund für die zunehmende Abweichung ist die Reduzierung des integralen Verfestigungsniveaus durch steigende Zahnmoduln (Bild 36). Diese hat Auswirkungen auf das elastische Rückfederungsverhalten der Zahnräder beim Austritt aus dem Verzahnungsbereich nach der Formgebung und beeinflusst die resultierende Formgenauigkeit.

Die Profilabweichung und die erreichten Toleranzklassen wurden auch für die schrägverzahnten Zahnräder betrachtet. Die Ergebnisse sind für beide Stahlsorten in Bild 48 dargestellt.

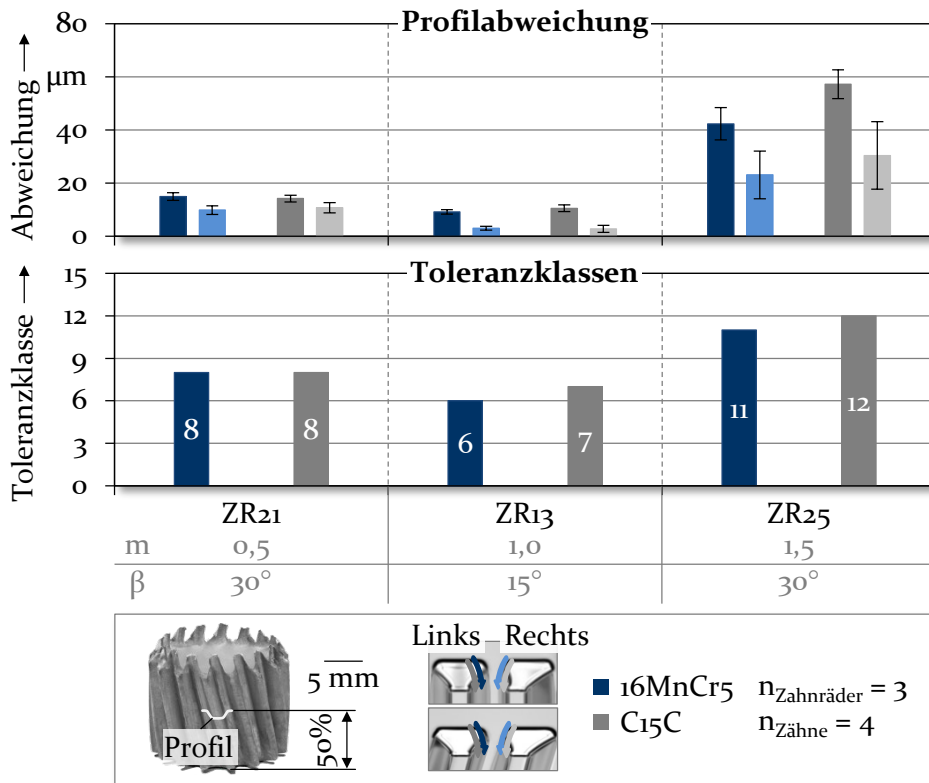


Bild 48: Einfluss Modul und Schrägungswinkel (experimentell): Profilabweichung (ZR21, ZR13 und ZR25)

Im Fall der Schrägverzahnung treten aufgrund der Materialflussumlenkung im Verzahnungseinlaufbereich auf der linken Zahnseite durchweg höhere Profilabweichungen auf. Die Werte betragen durchschnittlich $12 \mu\text{m}$ (ZR21), $6 \mu\text{m}$ (ZR13) und $38 \mu\text{m}$ (ZR25). Die verwendeten Stähle besitzen keinen merklichen Einfluss auf das Ergebnis. Für ZR21 erreichen die Werte eine Toleranzklasse von 8. Die Abweichungen von ZR13 sind etwas geringer und liegen innerhalb einer Toleranzklasse von 6 und 7. Im Fall von ZR25 resultieren höhere Abweichungen mit Toleranzklassen zwischen 10 und 11. Auch für die Schrägverzahnungen ist festzustellen, dass größere Moduln einen Anstieg der Profilabweichungen bewirken.

Zudem ist aus den Ergebnissen erkennbar, dass die Toleranzklassen der schrägverzahnenden im Vergleich zu den geradverzahnenden Zahnradern bei konstantem Modul höher sind. Eine Erklärung hierfür ist der erschwerte Materialfluss für die Ausformung einer Schrägverzahnung, wodurch die präzise Formfüllung der Verzahnungskontur erschwert wird.

Neben der Profil- wurde die Flankenabweichung der Zahnräder ermittelt. Bild 49 veranschaulicht die Ergebnisse für die hergestellten geradverzahnten Zahnräder.

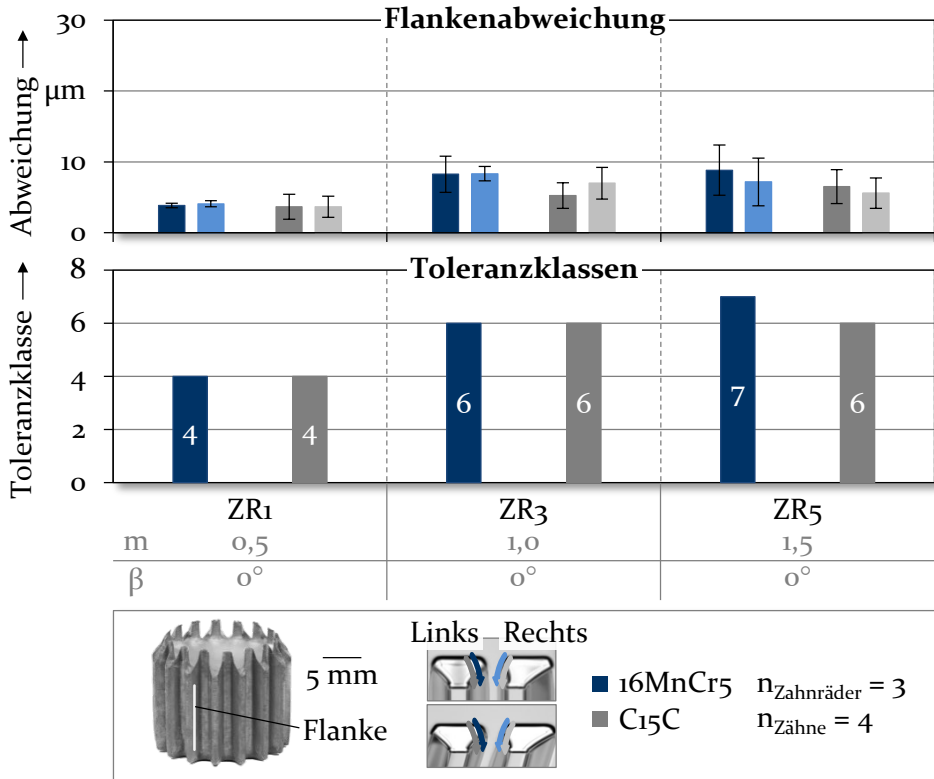


Bild 49: Einfluss Modul und Schrägungswinkel (experimentell): Flankenabweichung (ZR₁, ZR₃ und ZR₅)

Ein größerer Zahnmodul bedingt einen Anstieg der resultierenden Flankenabweichung. Für die untersuchten Zahnräder treten Werte im Mittel von 4 μm (ZR₁), 7 μm (ZR₃) und 8 μm (ZR₅) auf. Die Abweichungen sind unter Berücksichtigung der Standardabweichung für die untersuchten Stahlwerkstoffe vergleichbar. Für ZR₁ erreichen die Werte eine Toleranzklasse von 4. Bei ZR₃ wird eine Toleranzklasse von 6 und im Fall von ZR₅ zwischen 6 und 7 erzielt.

Erklärung für den Anstieg der Abweichungen innerhalb der Modulreihe ist das unterschiedliche Verfestigungsniveau der Zahnräder (Bild 36). Dies beeinflusst aufgrund des spezifischen Rückfederungsverhaltens die erreichbare Formgenauigkeit.

Die Flankenabweichung und deren Toleranzklassen wurden ebenfalls für die hergestellten Schrägverzahnungen ermittelt. Die Ergebnisse stellt Bild 50 für beide Stahlsorten gegenüber.

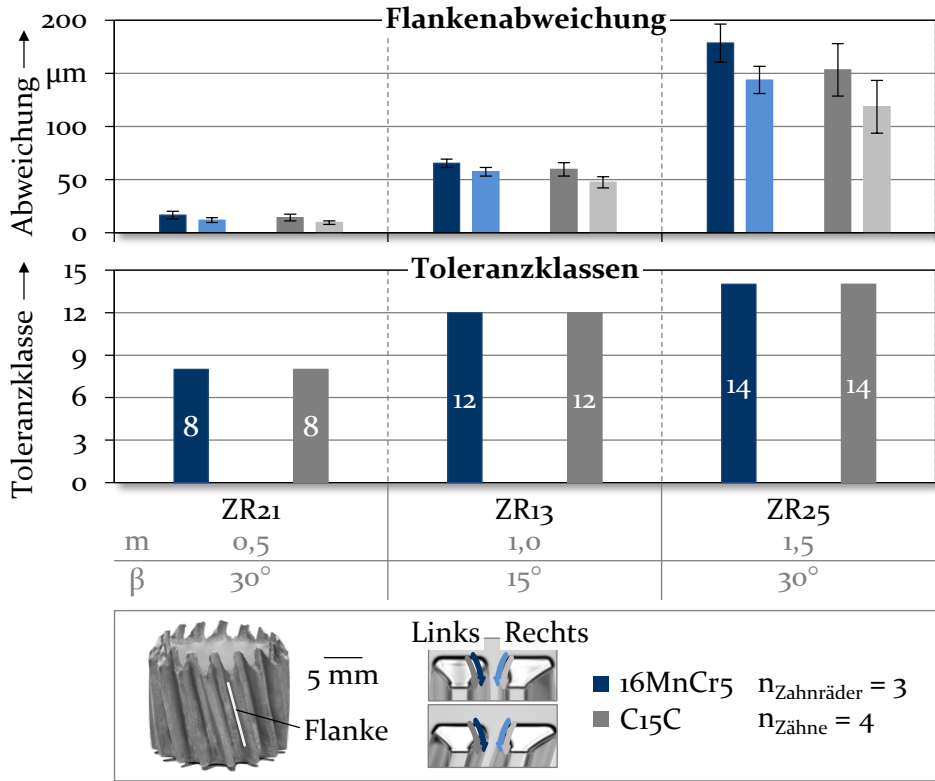


Bild 50: Einfluss Modul und Schrägungswinkel (experimentell): Flankenabweichung (ZR21, ZR13 und ZR25)

Die Herstellung einer Schrägverzahnung bedingt im Verzahnungseinlauf eine Materialflussumlenkung, wodurch die Flankenabweichungen auf der linken gegenüber der rechten Zahnseite höher sind. Durchschnittlich treten Werte von 13 µm (ZR21), 58 µm (ZR13) und 149 µm (ZR25) auf. Die Abweichungen für ZR21 liegen im Bereich einer Toleranzklasse von 8 und für ZR13 von 12. Die Werte für ZR25 sind innerhalb einer Toleranzklasse von 14. Die spezifizierten Flankenwinkel werden somit nicht erreicht.

Dies wird erklärt durch die elastische Deformation der Matrizenzähne während der Umformung (Bild 15) und die elastische Rückfederung der Bauteile nach dem Austritt aus dem Verzahnungsbereich. Aus den ermittelten Messwerten ist die Berechnung des erzielten Winkels der Zahnräder möglich. Für den Stahlwerkstoff 16MnCr5 betragen die Werte

29,9° (ZR21), 14,5° (ZR13) und 29,3° (ZR25). Die materialspezifische Festigkeit von C15C beeinflusst das elastische Werkzeug- und Werkstückverhalten, wodurch etwas geringere Flankenabweichungen resultieren.

Mechanische Eigenschaften

Der Einfluss der untersuchten Moduln und Schrägungswinkel auf die Härteverteilung der gerad- und schrägverzahnten Zahnräder wurde repräsentativ jeweils an einem Zahn in der Bauteilmitte für beide Stahlwerkstoffe ermittelt. Die Ergebnisse sind in Bild 51 gezeigt.

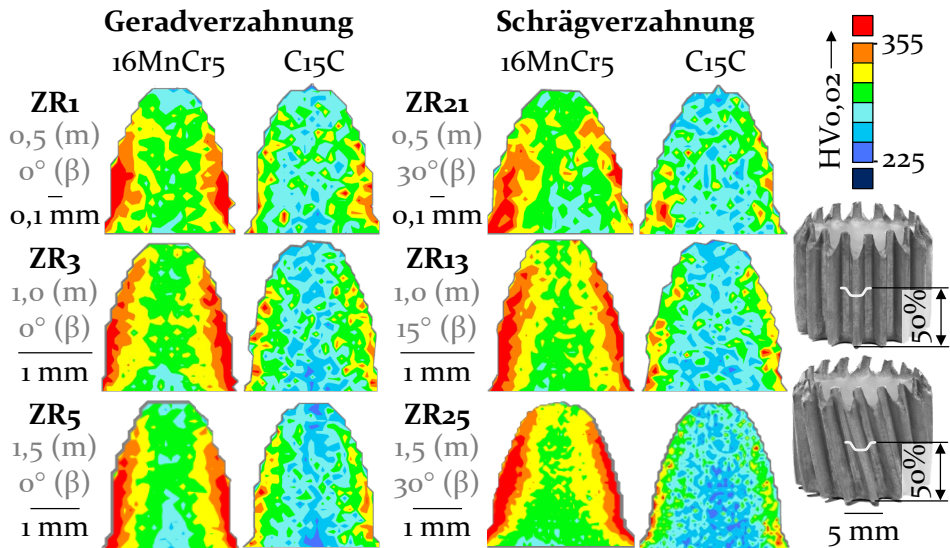


Bild 51: Einfluss Modul und Schrägungswinkel (experimentell): Härteverteilung

Grundsätzlich bedingt die Materialumformung eine Verfestigung im randnahen Flanken- und Fußbereich der Zähne. Unabhängig von der Verzahnungsart ist erkennbar, dass infolge einer Modulzunahme der absolute Anteil an Zonen mit geringeren Härtewerten - insbesondere im Mittenbereich der Zähne - zunimmt. Dieser Zusammenhang hat einen Einfluss auf das elastische Rückfederungsverhalten der Zahnräder nach dem Austritt aus dem Verzahnungsbereich und so Auswirkungen auf die Formgenauigkeit.

Für die Schrägverzahnung ergeben sich aufgrund der Stoffflussumlenkung in der Umformzone auf der linken Zahnseite höhere Härtewerte. Auch nimmt das Härteniveau im Mittenbereich der Zähne etwas zu. Dies ist auf die insgesamt stärkere Materialumformung bei der Ausformung von Schrägverzahnungen zurückzuführen.

Im Zuge der Härtemessung wird die Auflösung innerhalb der unterschiedlichen Zahngrößen durch ein einheitliches Messraster limitiert, wodurch die Qualität des Vergleichs beeinflusst wird. Die Unterschiede in den Härteniveaus innerhalb der Stahlsorten sind durch die unterschiedlichen Ausgangshärten von $235 \pm 10 \text{ HV}_{0,02}$ für 16MnCr5 und $198 \pm 13 \text{ HV}_{0,02}$ für C15C begründet.

Prozesseigenschaften

In Bezug auf die Prozesseigenschaften werden Auswirkungen einer Änderung des Moduls und des Schrägungswinkels auf die maximalen und relativen Prozesskräfte analysiert. Bild 52 stellt die Ergebnisse für die Stahlsorten 16MnCr5 und C15C gegenüber.

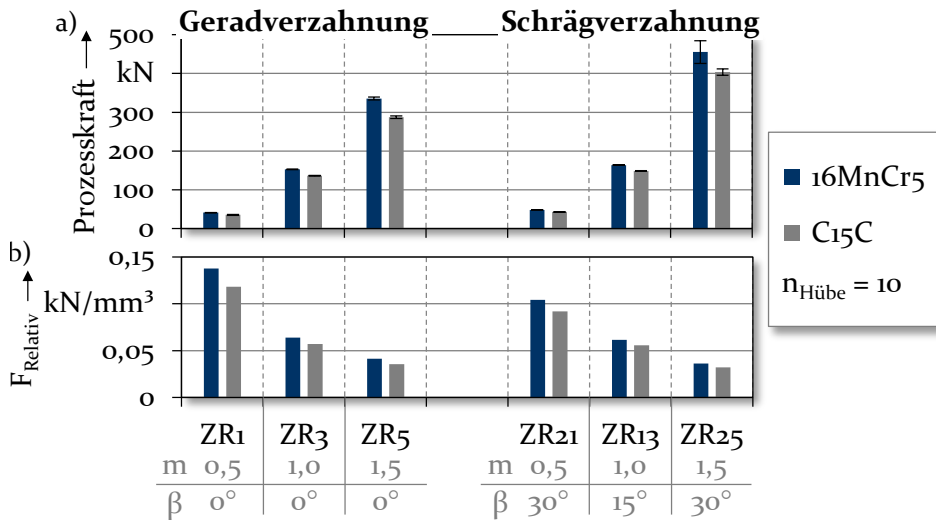


Bild 52: Einfluss Modul und Schrägungswinkel (experimentell): Prozesskraft – a) maximal und b) relativ

Mit zunehmenden Zahnmodul und damit Bauteilvolumen steigt der maximale Prozesskraftbedarf (Bild 52a). Für die geradverzahnten Zahnräder aus 16MnCr5 werden Maxima von $41,0 \pm 0,7 \text{ kN}$ (ZR1), $152,8 \pm 0,8 \text{ kN}$ (ZR3) und $335,2 \pm 3,7 \text{ kN}$ (ZR5) benötigt. Aufgrund des leichten Anstiegs des Zahnradvolumens durch den Flankenwinkel resultieren für die Schrägverzahnungen höhere Kraftmaxima. Die erforderlichen Kräfte betragen $48,3 \pm 0,3 \text{ kN}$ (ZR21), $163,8 \pm 0,7 \text{ kN}$ (ZR3) und $455,4 \pm 29,3 \text{ kN}$ (ZR5). Für die Herstellung der Zahnräder aus dem Werkstoff C15C sind die Prozesskraftmaxima aufgrund des geringeren Festigkeitsniveaus im Mittel um über 10 % geringer.

Um eine volumenunabhängige Aussage über die erforderlichen Prozesskräfte zu erhalten, wurde die relative Prozesskraft F_{Relativ} berechnet (Bild 52b). Innerhalb der untersuchten Modulreihe erfordert die Herstellung von Zahnrädern mit zunehmendem Modul respektive Bauteilgröße geringere relative Prozesskräfte. Zudem ist zu erkennen, dass für Schrägverzahnungen durchweg eine geringere relative Prozesskraft benötigt wird. Dieser Effekt ist bei beiden Stahlsorten zu erkennen. Somit werden die bisherigen Erkenntnisse aus dem Experiment für ZR₃ und ZR₁₃ sowie die in der Numerik ermittelten Zusammenhänge bestätigt. Eine Erklärung hierfür ist, dass im Fall der Geradverzahnung die symmetrische Umformzone eine größere Kontakt- und damit Reibfläche bewirkt. Bei der Ausformung von Schrägverzahnungen liegt aufgrund der Umlenkung des Stoffflusses ein geringerer Kontaktbereich vor. Aufgrund der geringeren Festigkeit treten für C15C etwas geringere Werte für F_{Relativ} auf.

6.3 Abgleich Experiment und Simulation

Zur Gewährleistung einer hohen Aussagekraft der numerischen Erkenntnisse über den Einfluss von Zahnradparametern auf das resultierende Prozessergebnis innerhalb des untersuchten Parameterraums erfolgte ein Vergleich der experimentellen und numerischen Ergebnisse der aufgebauten FE-Modelle. Der Vergleich von ZR₁, ZR₅, ZR₂₁ und ZR₂₅ wurde bauteilseitig hinsichtlich der Geometrie und mechanischen Eigenschaften sowie prozessseitig in Bezug auf die maximalen Prozesskräfte bewertet.

Abgleich Experiment und Simulation: Bauteileigenschaften

Bauteilseitig wurde eine Geometrieanalyse der experimentell hergestellten und digitalisierten Zahnräder mit den CAD-Daten der Bauteile aus der Simulation durchgeführt. Der Vergleich ist in Bild 53 gezeigt.

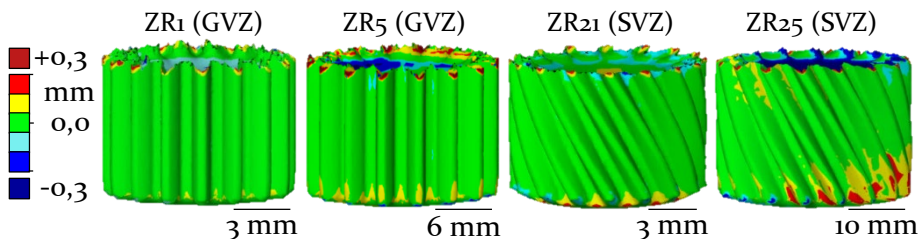


Bild 53: Validierung FE-Modelle: Geometrie

Mit den entwickelten FE-Modellen der Zahnradprozesse wird eine hohe Prognosegüte erzielt, wobei insbesondere der Verzahnungsbereich präzise abgebildet wird. Die im unteren Bereich von ZR₂₅ erkennbaren

Abweichungen deuten auf eine geringe Unterschätzung des Flankenwinkels hin. Die ist auf die hohen Kräfte und die auftretende elastische Deformation der Matrizenzähne während der Umformung im Experiment zurückzuführen. Insgesamt ist der Einfluss auf die Ergebnisqualität als gering zu bewerten. Im oberen und unteren Bauteilbereich sind leichte Abweichungen erkennbar. Diese sind ebenfalls unkritisch, da diese Bereiche im Zuge einer spanenden Nachbearbeitung entfernt werden.

Darüber hinaus wurde die Abbildungsgenauigkeit der FE-Modelle hinsichtlich der resultierenden mechanischen Eigenschaften der Zahnräder bewertet. Bild 54 zeigt hierzu einen repräsentativen Vergleich der gemessenen Härtewerte und der numerisch berechneten Umformgradverteilung im Verzahnungsbereich der Zahnräder.

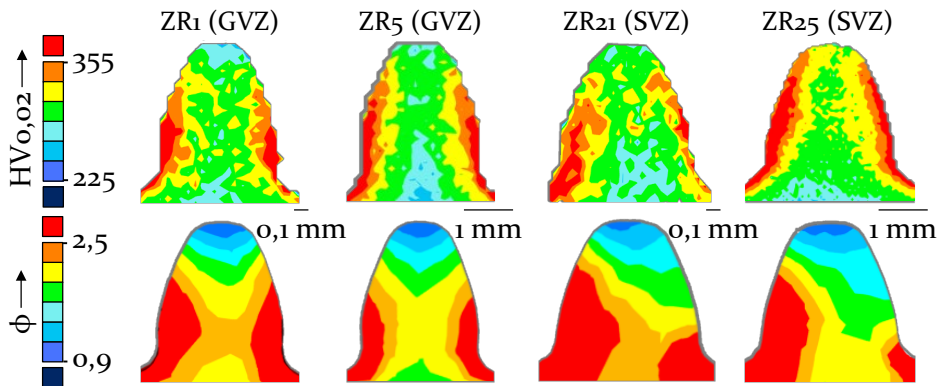


Bild 54: Validierung FE-Modelle: Mechanische Eigenschaften

Der Abgleich liefert eine qualitative Übereinstimmung der Härte- und Umformgradverteilung. Bereiche mit vergleichsweise höherer Verfestigung werden durch die Simulation vorhergesagt. Auch ist für die Geradverzahnung eine symmetrische und im Fall der Schrägverzahnung eine asymmetrische Verteilung der Werte erkennbar. Im Zuge der Härtemessungen begrenzt ein genormtes Messraster mit entsprechenden Punktabständen, angepasst auf die jeweilige Zahnradgröße, die Auflösung der Härtebilder und damit die Qualität des Vergleichs.

Abgleich Experiment und Simulation: Prozesseigenschaften

In Bezug auf die Prozesseigenschaften werden die experimentell und numerisch ermittelten Kraftmaxima bei der Herstellung der untersuchten Zahnräder betrachtet. Diese Gegenüberstellung der Kräfte und die zugehörige prozentuale Abweichung von Experiment und Simulation ist für ZR1, ZR5, ZR21 und ZR25 in Bild 55 zusammengefasst.

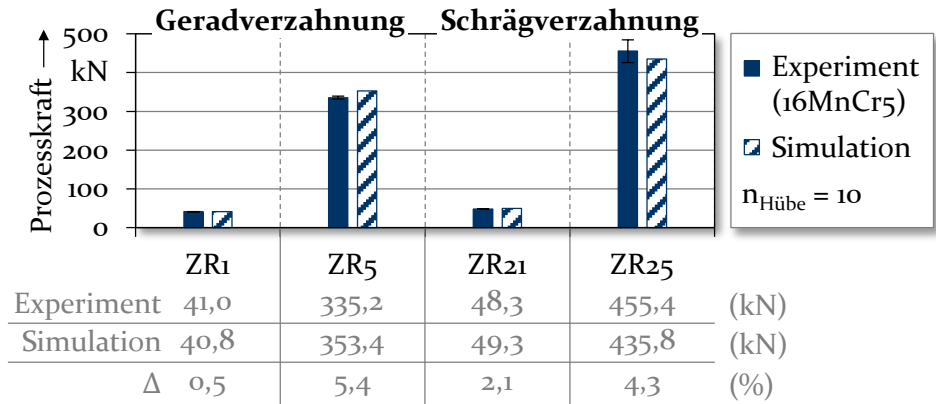


Bild 55: Validierung FE-Modelle: Prozesskraftmaxima

Die experimentell gemessenen Kraftmaxima für die geradverzahnten Zahnräder ZR₁ mit $41,0 \pm 0,5$ kN und ZR₅ mit $335,2 \pm 3,7$ kN werden durch die Simulation mit 40,8 kN und 353,5 kN präzise prognostiziert. Die prozentuale Abweichung beträgt 0,5 % für ZR₁ und 5,4 % für ZR₅. Auch im Fall der schrägverzahnten Zahnräder werden die maximalen Prozesskräfte aus dem Experiment für ZR₂₁ mit $48,3 \pm 0,3$ kN und ZR₂₅ mit $455,4 \pm 29,3$ kN realitätsnah vorhergesagt. Die Abweichung beträgt 2,1 % (49,3 kN) für ZR₂₁ und 4,3 % (435,8 kN) für ZR₂₅.

Der Abgleich der experimentell und simulativ ermittelten Bauteil- und Prozesseigenschaften liefert insgesamt eine gute Übereinstimmung. Somit sind die ermittelten numerischen Erkenntnisse innerhalb des Parameter-raums nutzbar, um das Prozessverständnis verbessern zu können.

7 Erforschung von Methoden zur Prozessbeeinflussung

Um das Potential des „Samanta“-Verfahrens für das Kaltfließpressen von Zahnrädern nutzbar zu machen, ist die Erforschung von Methoden zur vorteilhaften Beeinflussung des Prozessergebnisses ein entscheidender Schritt. Vor diesem Hintergrund wird der Einfluss praxisrelevanter Ansätze auf die resultierenden Bauteil- und Prozesseigenschaften untersucht. Hierzu erfolgen numerische Untersuchungen bei der Umformung der Referenzzahnräder (ZR₃ und ZR₁₃). Auf Basis der abgeleiteten Erkenntnisse werden sowohl die Prozesse der Zahnräder ZR₃ und Z₁₃ als auch die Prozesse für die Zahnräder ZR₀₁, ZR₀₅, ZR₂₁ und ZR₂₅ angepasst. Ziel ist der experimentelle Nachweis der Anwendbarkeit und die Quantifizierung der Wirksamkeit der erarbeiteten Maßnahmen. Von besonderem Interesse sind Erkenntnisse, inwiefern sich ein Effekt der Stellhebel auf das Prozessergebnis innerhalb der Verzahnungsarten und Zahnradgeometrien mit verändertem Modul und/oder Schrägungswinkel übertragen lässt.

7.1 Aufzeigen von Forschungsansätzen und Methoden zur Prozessbeeinflussung

Aus den bisherigen Erkenntnissen sind in Übereinstimmung mit vorhandenem Literaturwissen zwei wesentliche Forschungsschwerpunkte ableitbar, um diese durch praxisbezogene Methoden vorteilhaft zu beeinflussen. In Bild 56 werden diese Ansätze gezeigt.

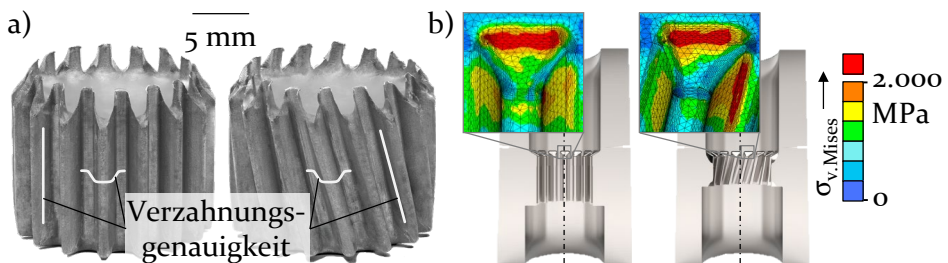


Bild 56: Forschungsansätze: a) Verzahnungsgenauigkeit und b) Werkzeugbeanspruchung

Ein Ziel ist, die Bauteilgenauigkeit hinsichtlich der Profil- und Flankenabweichung der kaltfließgepressten Zahnräder zu erhöhen (Bild 56a). Auch die Reduzierung des Beanspruchungsniveaus der eingesetzten Matrizen während der Umformung ist von wesentlichem Interesse (Bild 56b).

Basierend auf empirischem Wissen und Literaturhinweisen sind werkzeugseitige Geometrieadjustierungen des Verzahnungseinlaufs und die Ermittlung des Einflusses der Reibbedingungen vielversprechende Ansätze. Die untersuchten Methoden zur Prozessbeeinflussung fasst Bild 57 zusammen.

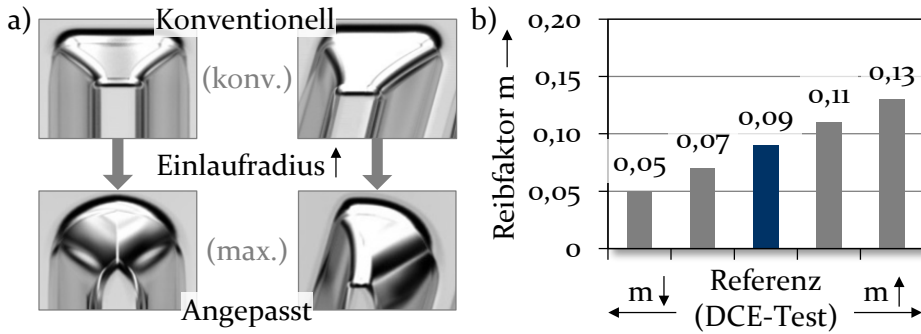


Bild 57: Untersuchte Methoden zur Prozessbeeinflussung: a) Verzahnungseinlauf und b) Reibung

Aus Werkzeugsicht werden die Radien im Verzahnungseinlauf sukzessive erhöht (Bild 57a). Ausgehend von üblicherweise in der Praxis verwendeten Werten (konv.) wird der Radius auf die konstruktiv maximal mögliche Größe erhöht (max.). Im Fall der Geradverzahnung werden beide Zahnseiten angepasst, wohingegen für die Schrägverzahnung nur die vom Materialfluss abgewandte Seite modifiziert wird. Die geometrische Anpassung der Umformzone zielt durch Reduzierung der Fließbehinderung auf die Stoffflusssteuerung/-erleichterung ab, um damit die Formgenauigkeit zu steigern und die Beanspruchung der Werkzeuge während der Umformung zu verringern.

Bislang ist der Einfluss der tribologischen Bedingungen während des Kaltfließpressens auf die resultierenden Bauteil- und Prozesseigenschaften noch nicht hinreichend grundlegend untersucht. Anhand des im DCE-Test ermittelten Reibfaktors werden deshalb durch Variation des Reibfaktors verschiedene Reibbedingungen modelliert und analysiert (Bild 57b). So werden Erkenntnisse abgeleitet, um gezielt Anforderungen hinsichtlich vorteilhafter Reibbedingungen an das Schmiersystem zu formulieren.

7.2 Numerische Einflussanalyse und deren Ursachen

Der Einfluss der vorgestellten Methoden (Bild 56) zur Prozessbeeinflussung wurde simulativ anhand der FE-Modelle der Referenzprozesse erforscht. In diesem Kontext wurden Einflüsse der Stellhebel auf die Bau-

teileigenschaften hinsichtlich der nutzbaren Höhe h_N , der Genauigkeit und der Umformgradverteilung ermittelt. In Bezug auf die Prozesseigenschaften wurden die erforderlichen Prozesskräfte und die maximale Werkzeugbeanspruchung ausgewertet. Die Ergebnisse werden getrennt nach den Verzahnungsarten betrachtet, um Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu identifizieren.

7.2.1 Verzahnungseinlaufradius

Die Anpassung der Umformzone der gerad- und schrägverzahnten Matrizen fokussiert auf die Reduzierung des Fließwiderstands für den auftretenden Materialfluss. Zur Ermittlung eines möglichen Einflusses auf das Prozessergebnis werden die Bauteil- und Prozesseigenschaften untersucht.

Bauteileigenschaften

Bauteilseitig wurden geometrische Aspekte wie die Materialeffizienz und die Verzahnungsgenauigkeit untersucht. Zur Analyse der mechanischen Eigenschaften wurde die Umformgradverteilung im Zahnfußbereich betrachtet.

Nutzbare Höhe

Die Auswirkungen einer Radiusserhöhung im Verzahnungseinlauf auf die Bauteileigenschaften werden unter anderem in Bezug auf die nutzbare Höhe h_N ermittelt. Bild 58 stellt die Ergebnisse für ZR₃ (GVZ) und ZR₁₃ (SVZ) gegenüber.

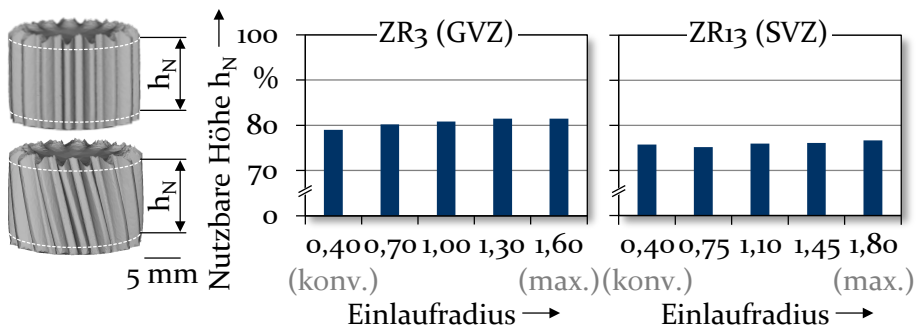


Bild 58: Einfluss Verzahnungseinlauf: Nutzbare Höhe h_N

Der Anteil der nutzbaren Höhe h_N wird für ZR₃ von 78 % auf 82 % und für ZR₁₃ von 75 % auf 77 % infolge einer geringeren Fließbehinderung des Materialflusses in der Umformzone verbessert. Die Materialeffizienz ist für die Schrägverzahnung tendenziell etwas niedriger. Eine Erklärung ist,

dass durch die Ausformung einer Schrägverzahnung der Materialfluss in die Verzahnungskavitäten gegenüber einer Geradverzahnung erschwert und in den Mittenbereich der Bauteile begünstigt wird (Bild 13). Dies bedingt die Vergrößerung des Einlaufbereichs der Zahnräder und reduziert den nutzbaren Anteil.

Verzahnungsgenauigkeit

Der Einfluss einer Radiuserhöhung wurde in Bezug auf die Verzahnungsgenauigkeit hinsichtlich Profil und Flanke untersucht. Die Ergebnisse sind in Bild 59 für beide Verzahnungsarten dargestellt.

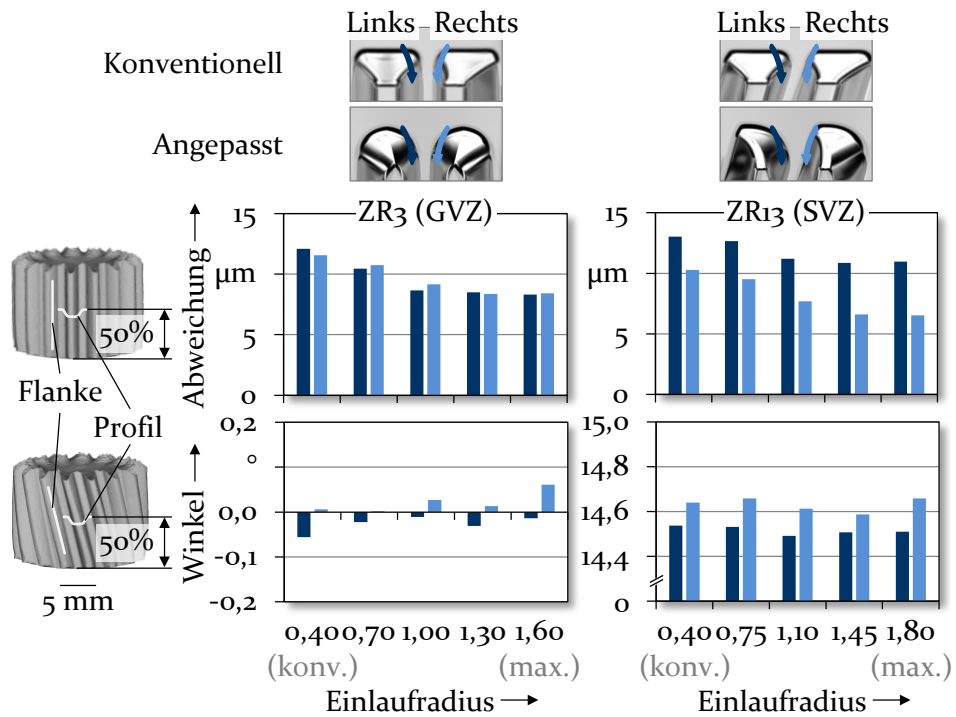


Bild 59: Einfluss Verzahnungseinlauf: Verzahnungsgenauigkeit

Die Profilabweichung wird im Fall der Geradverzahnung durch die Erhöhung des Einlaufradius im Bereich von $12 \mu\text{m}$ auf $8 \mu\text{m}$ reduziert. Die Genauigkeit der linken und rechten Zahnseiten ist annähernd symmetrisch. Für die Schrägverzahnung wird die Profilabweichung im Mittel beider Zahnseiten ebenfalls verringert, von etwa $12 \mu\text{m}$ auf Werte von $9 \mu\text{m}$. Die Verteilung der Werte ist aufgrund des prozessspezifischen Stoffflusses bei der Ausformung des Schrägungswinkels asymmetrisch. Ein Grund für die ermittelte Reduzierung der Profilabweichung beider Verzahnungsarten ist die geringere Fließbehinderung des Werkstoffflusses.

ses im Schulterbereich der Matrize, wodurch die konturnahe Ausformung der Verzahnungskavität begünstigt wird.

Die Flankengenauigkeit wird durch die Berechnung des erreichten Flankenwinkels bewertet. Im Fall der Geradverzahnung schwanken die Werte für die untersuchten Radien geringfügig um 0° . Der Zielwert für den Flankenwinkel der Schrägverzahnung beträgt 15° . Dieser Winkel wird unabhängig von der Größe der Einlaufadien nicht erreicht und beträgt im Mittel $14,6^\circ$. Erklärung hierfür sind die rückfederungsbedingten Maß- und Formänderungen nach dem Entformen der Zahnräder aus dem Verzahnungsbereich der Matrize [19]. Innerhalb der numerischen Untersuchungen zeigt die geometrische Anpassung der Umformzone keinen wesentlichen Einfluss auf den resultierenden Flankenwinkel beider Verzahnungsarten.

Verfestigung (Zahnfuß)

Zur Beurteilung eines möglichen Effekts einer Vergrößerung der Einlaufadien auf die mechanischen Eigenschaften der Zahnräder wurde die Umformgradverteilung im Zahnfußbereich der Bauteile ausgewertet [21]. Bild 60 zeigt die Ergebnisse für beide Verzahnungsarten.

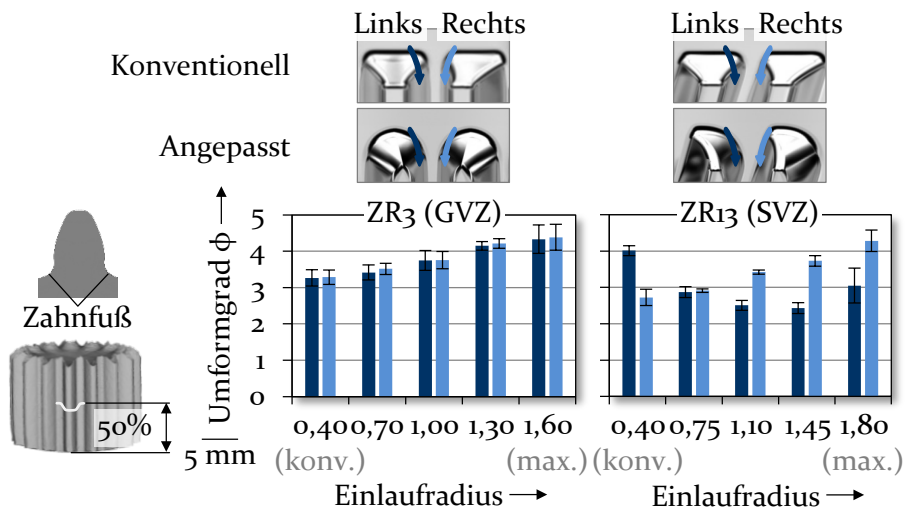


Bild 60: Einfluss Verzahnungseinlauf: Umformgradverteilung (Zahnfuß)

Im Fall der Geradverzahnung tritt eine symmetrische Verteilung der Umformgrade innerhalb beider Zahnseiten auf. Durch die Radiusserhöhung ist ein Anstieg des Umformgradniveaus von etwa $\phi = 3,2$ (0,40) auf $\phi = 4,3$ (1,60) erkennbar. Grund hierfür ist, dass das umzuförmende Material im

Bereich der Matrizenzahnschneidspitze aufgrund der geringeren Umformzone stärker umgelenkt und deformiert wird.

Für die Schrägverzahnung liegt eine asymmetrische Verteilung der Umformgrade zwischen der linken und rechten Zahnseite vor. Im Mittel der Zahnseiten werden Umformgrade im untersuchten Intervall der Einlauf-radien von $\phi = 3,2$ erreicht. Durch die Vergrößerung des Radius wechselt die stärker verfestigte Zahnseite. Für einen Radius von 0,40 betragen die Umformgrade auf der linken Zahnseite etwa $\phi = 4,0$ und auf der rechten Seite rund $\phi = 2,8$. Im Fall eines Einlaufradius von 1,80 werden auf der linken Zahnseite Umformgrade im Bereich von $\phi = 3,0$ und auf der rechten von $\phi = 4,2$ erreicht. Die RADIUSERHÖHUNG bewirkt eine geringere Fließbehinderung, wodurch die Fließgeschwindigkeit des Werkstoffes steigt. Dies begründet den Anstieg der Umformgrade im rechten Zahnfußbereich, da der Werkstoff nun schneller um die nicht angepasste Matrizenkante im Verzahnungsbereich der Matrize fließt.

Prozesseigenschaften

Im Hinblick der Prozesseigenschaften wurden Auswirkungen einer angepassten Umformzone auf die benötigten Prozesskräfte analysiert. Zudem wurden für versagensrelevante Werkzeugbereiche der eingesetzten Matrize die Spannungsmaxima ermittelt.

Prozesskräfte

Der Einfluss einer RADIUSERHÖHUNG in der Umformzone der Matrizen wurde in Bezug auf die erforderlichen maximalen Prozesskräfte und deren Stempelkraft- sowie Reibanteil für beide Verzahnungsarten untersucht. In Bild 61 werden diese Ergebnisse gezeigt.

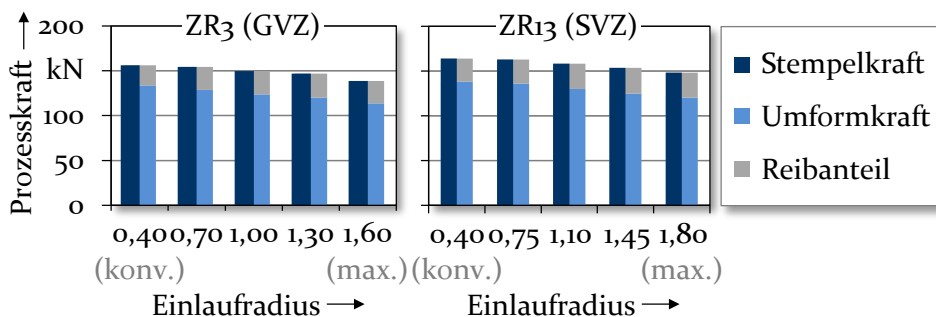


Bild 61: Einfluss Verzahnungseinlauf: Prozesskraft (maximal)

Unabhängig von der Verzahnungsart bewirkt eine stetige Erhöhung des Einlaufradius eine Reduzierung der maximalen Prozesskräfte. Im Fall der Geradverzahnung wird die Prozesskraft von 156,3 kN auf 138,8 kN um

rund 11 % und für die Schrägverzahnung von 163,9 kN auf 148,1 kN um etwa 10 % reduziert. Das absolute Niveau der Prozesskräfte für die Schrägverzahnung liegt höher, da das umgeformte Bauteilvolumen aufgrund der zahnradspezifischen Geometriezusammenhänge (Bild 5) steigt. Erklärung für die Reduzierung der Prozesskräfte ist die verringerte Stoffflussbehinderung und damit Umlenkung beim Eintritt des Materials in den Verzahnungsbereich. Unabhängig von der Verzahnungsart nimmt der Reibanteil im Verhältnis zur benötigten Stempelkraft geringfügig zu, da die Kontaktfläche und somit die Reibfläche durch Vergrößerung der Einlaufradien steigt.

Werkzeugbeanspruchung

Der quantitative Einfluss der werkzeugseitigen Anpassung der Umformzone auf die maximale Werkzeugbeanspruchung der gerad- und schrägverzahnenden Matrizen wurde für die ausgewählten Spannungskomponenten ermittelt. Bild 62 fasst die Ergebnisse zusammen.

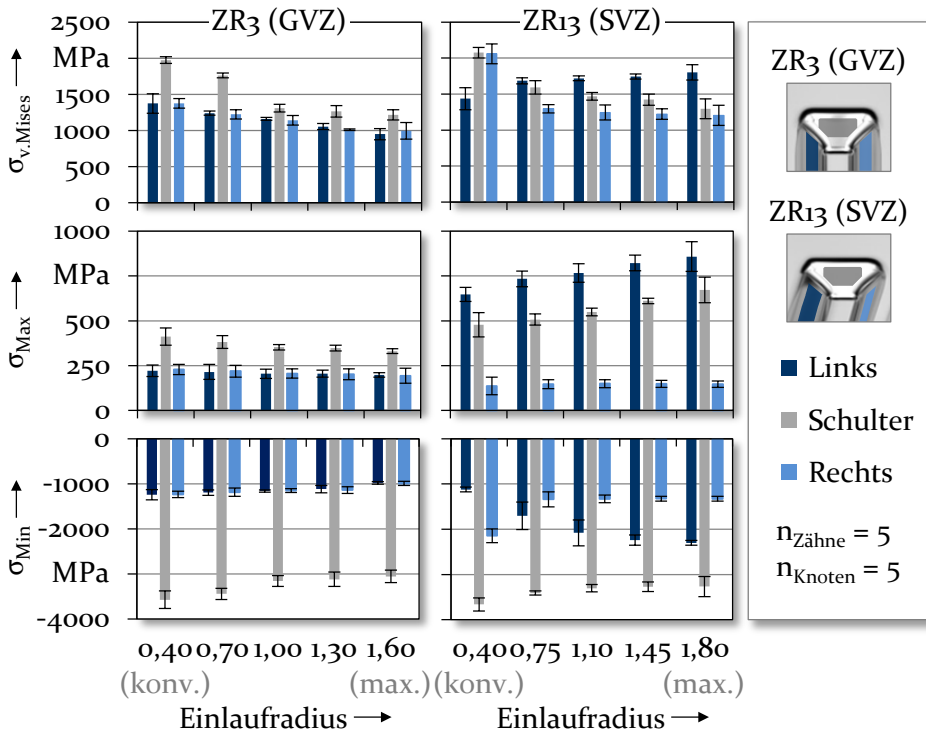


Bild 62: Einfluss Verzahnungseinlauf: Werkzeugbeanspruchung (maximal)

Bei beiden Verzahnungsarten bewirkt die Radiusanpassung hinsichtlich $\sigma_{v.Mises}$ eine Reduzierung der Spannungswerte im Schulterbereich um etwa 35 % von etwa 2.000 MPa auf 1.300 MPa. Für die geradverzahnte Matrize werden zudem die Spannungswerte im Seitenbereich um rund 30 % verringert. Im Fall der Schrägverzahnung werden die Spannungswerte an der rechten Seitenfläche um über 40 % reduziert. Die Vergrößerung des Radius bewirkt im Fall der schrägverzahnten Matrize eine größere Kontaktfläche, wodurch es auf der gegenüberliegenden linken Seitenfläche zu einem Anstieg der Spannungen um rund 25 % kommt. Absolute Spannungswerte werden durch die Radiusanpassung für beide Verzahnungsarten reduziert. Die Spannungsabnahme ist auf die Anpassung der Umformzone zurückzuführen, die Einfluss auf den Stofffluss während der Umformung und damit auf die resultierende Beanspruchung der Matrizen hat. Dieser Zusammenhang wird in Bild 63 schematisch dargestellt.

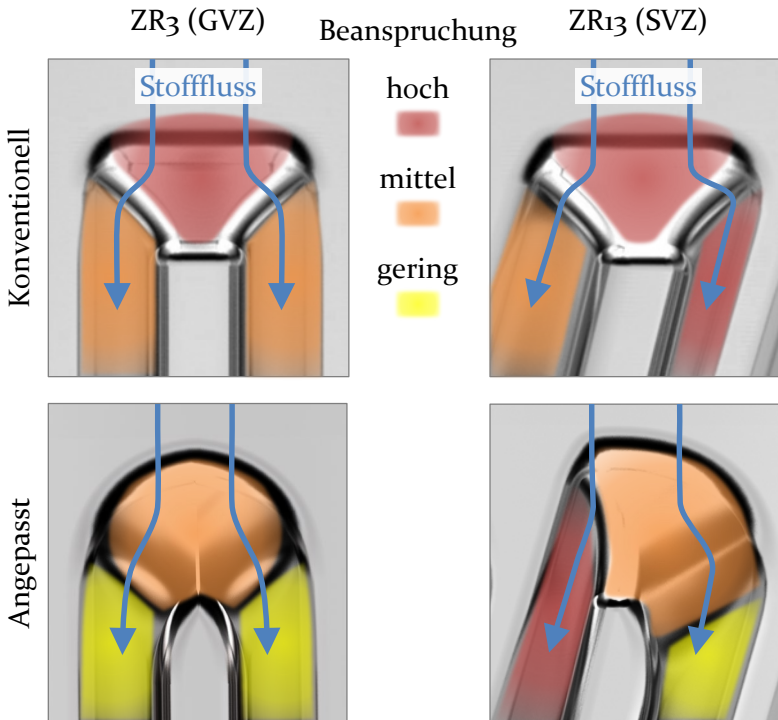


Bild 63: Modellvorstellung: Auswirkungen auf den Stofffluss und die resultierende Beanspruchung von gerad- und schrägverzahnten Matrizen durch Anpassung der Umformzone

Durch die Radiusvergrößerung im Einlaufbereich beider Matrizen wird der Fließwiderstand für den eintretenden Materialfluss verringert. Hierdurch werden axial wirkende Kräfte auf die Werkzeugoberflächen

reduziert. Zusätzlich wird durch die Geometrieangepassung in der Umformzone eine gleichmäßigere Spannungsverteilung erreicht. Hierdurch wird das integrale Werkzeugbeanspruchungsniveau hinsichtlich der auftretenden Vergleichsspannungen ($\sigma_{v.Mises}$) reduziert.

Für die Geradverzahnung ist durch die Radiusanpassung eine Reduzierung der Zugspannungen (σ_{Max}) im Schulterbereich um knapp 20 % von etwa 400 MPa auf 330 MPa möglich. An den Seitenflächen bleibt das Spannungsniveau konstant. Die vergrößerte Kontaktfläche infolge der Radiusserhöhung bewirkt im Fall der Schrägverzahnung eine Erhöhung der Zugspannungen im Schulter- und im linken Seitenbereich der Matrizenzähne um über 30 %. Grund hierfür ist die Erhöhung des Biegemoments durch die vergrößerte Kontaktfläche auf der angepassten, rechten Matrizenzahnseite. In diesem Bereich bleibt das Spannungsniveau konstant mit Werten von 150 MPa.

Durch die Anpassung des Einlaufradius ist für die Geradverzahnung eine Reduzierung der auftretenden Druckbeanspruchung (σ_{Min}) im Schulterbereich um circa 15 % und im seitlichen Bereich des Matrizenzahns um etwa 20 % möglich. Für die Schrägverzahnung ist das Spannungsniveau im Schulterbereich um über 10 % reduzierbar. Eine Verringerung der maximalen Druckspannungswerte ist auch im rechten Seitenbereich um über 35 %, von rund - 2.100 MPa auf - 1.300 MPa realisierbar. Jedoch steigen aufgrund der größeren Kontaktfläche und des damit verbundenen höheren Kontaktdrucks die Druckspannungen im linken Seitenbereich von etwa - 1.100 MPa auf - 2.300 MPa an. Grundsätzlich hat die Radiusanpassung auf das absolut auftretende Spannungsniveau einen positiven Einfluss.

7.2.2 Reibung

Die tribologischen Bedingungen während des Kaltfließpressens besitzen Einfluss auf den Umformprozess. Für die Ableitung von Anforderungen an das eingesetzte Schmiersystem im Experiment hinsichtlich der auftretenden Reibung ist die Kenntnis über deren Einfluss auf die Bauteil- und Prozesseigenschaften notwendig. In diesem Kontext wurden im Rahmen der numerischen Untersuchungen Reibfaktoren im Intervall von 0,05 bis 0,13 eingesetzt, um geringe sowie erhöhte Reibbedingungen während der Umformung nachzubilden. Der Referenzwert für den Reibfaktor aus dem DCE-Test beträgt 0,09.

Bauteileigenschaften

Aus Bauteilsicht wurde ein Einfluss der Reibung auf die Materialeffizienz und die Verzahnungsgenauigkeit untersucht. Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften wurden durch die Analyse der Umformgradverteilung im Zahnfußbereich ermittelt.

Nutzbare Höhe

Im Hinblick der Bauteileigenschaften wurde die nutzbare Höhe h_N analysiert. Die Ergebnisse für ZR₃ (GVZ) und ZR₁₃ (SVZ) sind in Bild 64 dargestellt.

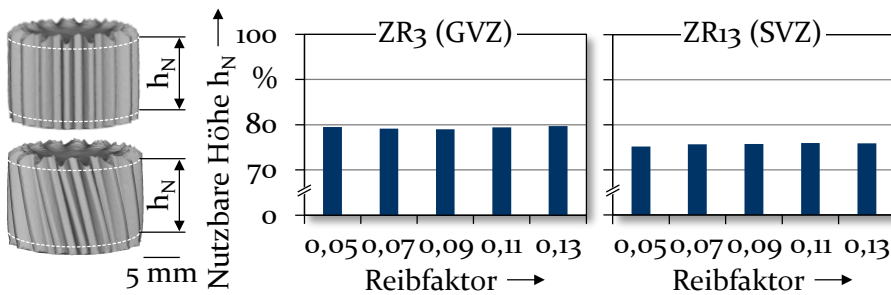


Bild 64: Einfluss Reibung: Nutzbare Höhe h_N

Die Werte für das geradverzahnte Zahnrad schwanken im Mittel um 79 %. Im Fall der Schrägverzahnung werden Werte von rund 76 % erreicht. Für beide Verzahnungsarten ist kein Effekt durch unterschiedliche Reibniveaus erkennbar. Die insgesamt etwas geringeren Werte der Schrägverzahnung sind auf den erschwerten Materialflusses im Verzahnungsbereich und den begünstigten Materialfluss im Mittenbereich der Bauteile zurückzuführen, wodurch der Einlaufbereich vergrößert und der nutzbare Anteil reduziert wird (Bild 13).

Verzahnungsgenauigkeit

Der Einfluss der Reibung wurde auf die Verzahnungsgenauigkeit hinsichtlich des Profils und der Flanke bestimmt. Die Ergebnisse werden für beide Verzahnungsarten in Bild 65 gezeigt.

Im Fall der Geradverzahnung treten innerhalb der linken und rechten Seite annähernd symmetrische Werte für die Profilabweichung auf und betragen im Mittel etwa 11 μm . Für die untersuchten Reibbedingungen ist keine wesentliche Reduzierung oder Erhöhung der Profilabweichung zu erkennen. Für das schrägverzahnte Zahnrad ist bei unterschiedlichen Reibbedingungen auch kein wesentlicher Effekt auf die Profilabweichung feststellbar. Aufgrund der Umlenkung des Stoffflusses in der Umformzone

bei der Ausformung des Schrägungswinkels liegt eine asymmetrische Verteilung der Werte zwischen der linken und rechten Zahnseite vor. Im Mittel treten Werte für die Profilabweichung von rund 12 μm auf.

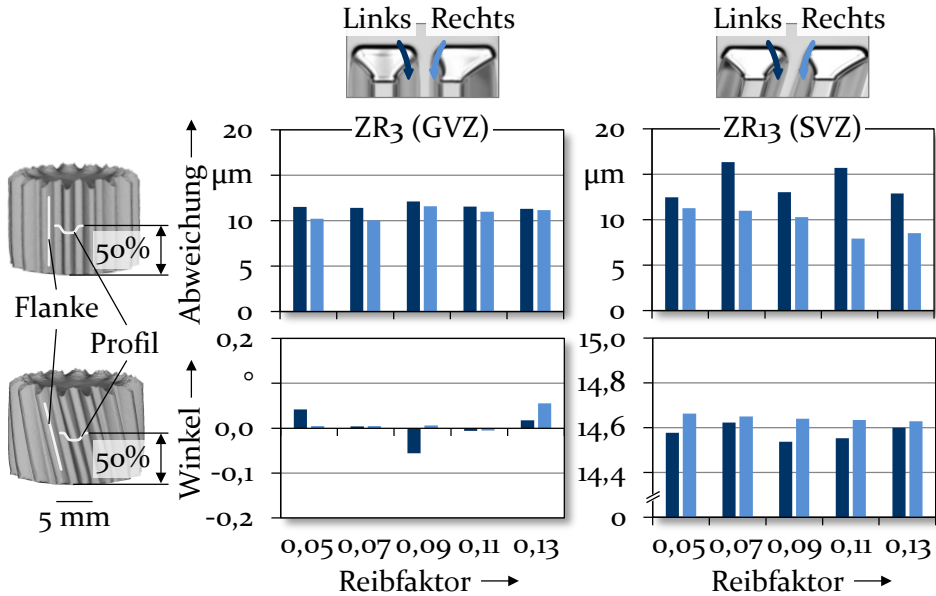


Bild 65: Einfluss Reibung: Verzahnungsgenauigkeit

Für die Geradverzahnung schwanken die Winkel innerhalb der untersuchten Reibfaktoren geringfügig um 0° . Der geforderte Flankenwinkel der Schrägverzahnung beträgt 15° . Auch für unterschiedliche Reibbedingungen wird dieser nicht erreicht und beträgt im Mittel etwa $14,6^\circ$. Eine Ursache hierfür ist das elastische Deformationsverhalten der Zahnräder beim Ausschleiben aus dem Verzahnungsbereich der Matrize, wodurch die Formgenauigkeit der Zahnflanken beeinträchtigt wird [191]. Die auftretende Reibung ist somit keine geeignete Methode zur Stoffflusssteuerung um die Bauteilgenauigkeit erhöhen zu können.

Verfestigung (Zahnfuß)

Der Einfluss der tribologischen Bedingungen wurde für beide Verzahnungsarten auf die Umformgradverteilung im Zahnfußbereich der Bauteile ermittelt. Die Ergebnisse sind für die Geradverzahnung (ZR3) und Schrägverzahnungen (ZR13) in Bild 66 dargestellt.

Für das geradverzahnte Zahnrad sind die Umformgrade für die linken und rechten Zahnseiten durch eine symmetrische Verteilung gekennzeichnet. Infolge höherer Reibbedingungen werden die Umformgrade im Zahnfußbereich des Zahnrads von etwa $\phi = 3,0$ (0,05) auf $\phi = 3,4$ (0,13) erhöht.

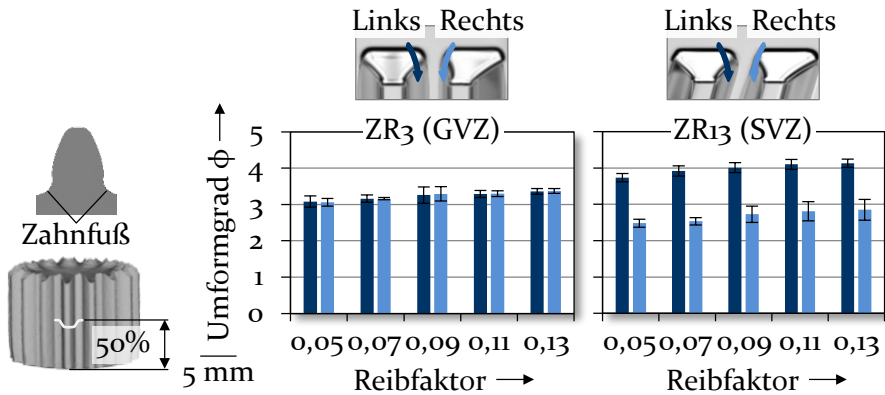


Bild 66: Einfluss Reibung: Umformgradverteilung (Zahnfuß)

Auch im Fall der Schrägverzahnung ist für höhere Reibfaktoren ein Anstieg ersichtlich. Im Mittel beider Zahnseiten werden die Werte von $\phi = 3,1$ (0,05) auf $\phi = 3,5$ (0,13) erhöht. Aufgrund der Umlenkung des Werkstoffflusses bei der Ausformung des Schrägungswinkels liegt eine asymmetrische Verteilung der Umformgrade innerhalb der Zahnseiten vor. Unabhängig von der Verzahnungsart ist ein Anstieg der Umformgrade infolge einer höheren Reibung auf die damit verbundene Zunahme der Reibschubspannungen in der Wirkfuge zurückzuführen [200].

Prozesseigenschaften

Die auftretende Reibung wurde hinsichtlich ihres Einflusses auf die Prozesseigenschaften in Bezug auf die Prozesskräfte untersucht. Zudem wurde die Werkzeugbeanspruchung der Matrizen analysiert.

Prozesskräfte

Der Einfluss der tribologischer Bedingungen auf die Prozesseigenschaften wurde in Bezug auf die maximalen Prozesskräfte und dem entsprechenden Umformkraft- sowie Reibanteil bei der Herstellung von ZR3 und ZR13 untersucht. Die Ergebnisse zeigt Bild 67.

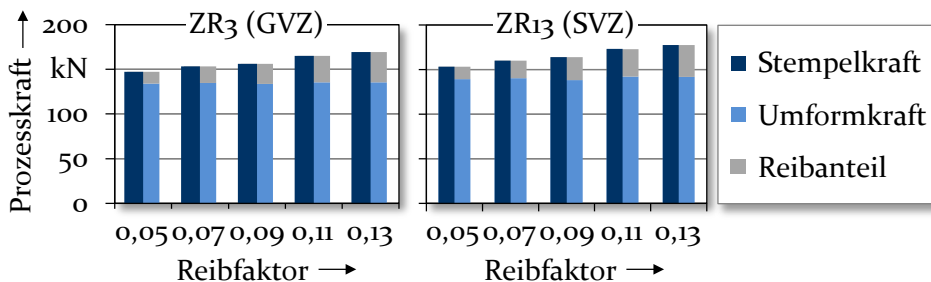


Bild 67: Einfluss Reibung: Prozesskraft (maximal)

Eine höhere Reibung bewirkt unabhängig von der Verzahnungsart einen unmittelbaren Anstieg der Prozesskräfte und des entsprechenden Reibanteils im Verhältnis zur Stempelkraft. Für die Geradverzahnung wird die Prozesskraft von 147,1 kN auf 169,4 kN um etwa 15 % und im Fall der Schrägverzahnung von 153,1 kN auf 177,5 kN um rund 16 % erhöht. Der Anstieg der Prozesskräfte ist durch die zunehmenden Kontaktspannungen zwischen Werkstück und Werkzeug zu erklären. Das insgesamt höhere Niveau der Prozesskräfte für die Schrägverzahnung resultiert aus dem größeren Bauteilvolumen aufgrund der etwas größeren Durchmesser von ZR13 gegenüber ZR3 (Bild 5).

Werkzeugbeanspruchung

Der Einfluss der Reibung wurde für beide Verzahnungsarten auf die maximale Werkzeugbeanspruchung ermittelt. Vor diesem Hintergrund wurden die versagenskritischen Spannungskomponenten $\sigma_{v.Mises}$, σ_{Max} und σ_{Min} und deren maximal auftretenden Werte in der Umformzone der gerad- und schrägverzahnten Matrizen analysiert. In Bild 68 werden die Ergebnisse zusammengefasst.

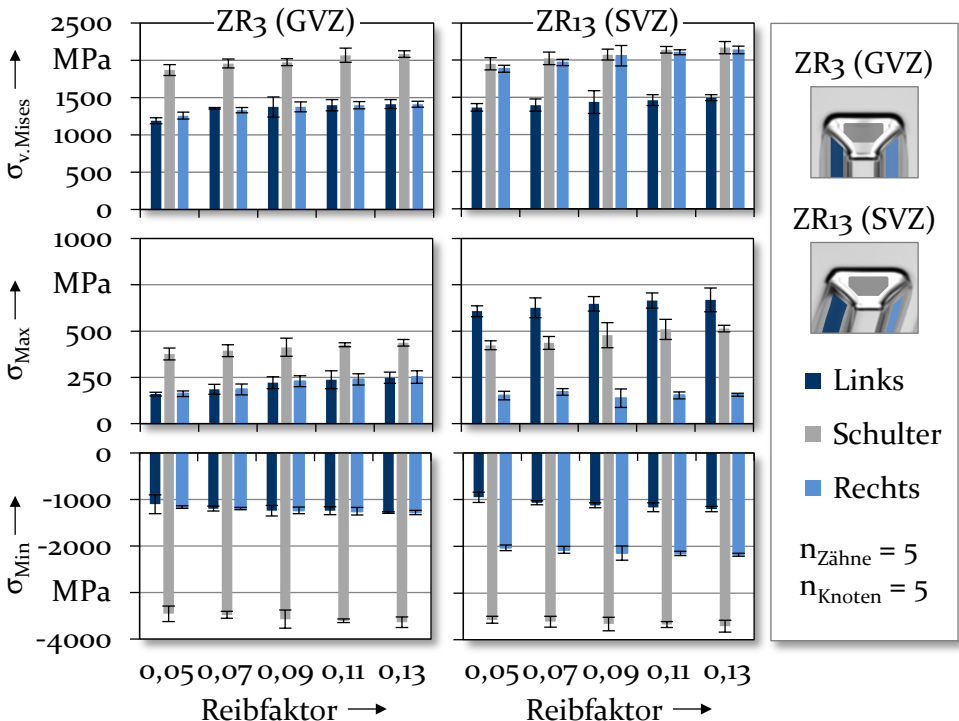


Bild 68: Einfluss Reibung: Werkzeugbeanspruchung (maximal)

Für die verzahnten Matrizen bewirkt die Erhöhung der Reibung innerhalb der untersuchten Reibfaktoren hinsichtlich $\sigma_{v.Mises}$ eine Steigerung der Spannungswerte im Schulterbereich um über 10 %, von etwa 1.900 MPa auf über 2.100 MPa. Im Fall der Geradverzahnung nehmen die Spannungen im linken und rechten Seitenbereich der Matrizenzähne um rund 15 % zu. Auch für die Schrägverzahnung werden Spannungen an den Seitenflächen um über 10 % erhöht. Im Fall der schrägverzahnten Matrizen ist die asymmetrische Verteilung der Spannungswerte im seitlichen Bereich des Matrizenzahns durch die Ausformung des Schrägungswinkels und des damit verbundenen unterschiedlichen Kontaktdrucks auf die Matrizenzähne während der Umformung begründet. Unabhängig von der Verzahnungsart ist der Anstieg der maximalen Spannungswerte für $\sigma_{v.Mises}$ in der Umformzone der Matrizen auf die zunehmenden Kontaktspannungen in der Wirkfuge infolge einer höheren Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug zurückzuführen.

Ebenfalls steigen innerhalb der gewählten Reibfaktoren die Zugspannungsanteile (σ_{Max}) im Schulterbereich beider Matrizen um über 15 % von Werten im Bereich von 400 MPa auf 500 MPa an. An den linken und rechten Seitenflächen der geradverzahnten Matrize ist eine Erhöhung der Spannungswerte um über 50 % von etwa 160 MPa auf 250 MPa ersichtlich. Im Fall der Schrägverzahnung ist das Zugspannungsniveau an der linken Seitenfläche des Matrizenzahns aufgrund des auftretenden Biegemoments während der Umformung deutlich höher. Mit einem Anstieg der Reibung wird dieses zusätzlich um etwa 10 % erhöht. Auf der rechten Seitenfläche treten konstante Werte von rund 150 MPa auf.

Auch bewirken die mit zunehmendem Reibfaktor höheren Reibschubspannungen eine Steigerung der Druckspannungsanteile (σ_{Min}) im Schulterbereich der Matrizen um etwa 5 %. Die resultierenden Maxima nehmen von rund - 3.500 MPa auf - 3.700 MPa zu. Im Fall der Geradverzahnung liegen die Spannungswerte im linken und rechten Seitenbereich der Matrizenzähne um circa 15 % höher. Für die Schrägverzahnung werden Spannungswerte an der linken um über 25 % und an der rechten Matrizen Zahnseite um über 5 % gesteigert. Der höhere Anstieg auf der linken Matrizen Zahnseite resultiert infolge der größeren Kontakt- und damit Reibfläche zwischen Werkstück und Werkzeug, da der Werkstoff in diesem Bereich nicht um die Matrizenkante fließen muss.

7.3 Verifizierung der numerischen Erkenntnisse

Eine Anpassung der Einlaufradien in der Umformzone der gerad- und schrägverzahnten Matrizen zeigt in den numerischen Untersuchungen das Potential, die Bauteil- und Prozesseigenschaften vorteilhaft zu beeinflussen. Die auftretende Reibung ist unabhängig vom Niveau nicht zur gezielten Stoffflusssteuerung für das Kaltfließpressen von Zahnrädern nutzbar, um damit beispielsweise die Bauteilgenauigkeit zu steigern. Aus den ermittelten Einflüssen unterschiedlicher Reibbedingungen auf die Prozessgrößen ist jedoch eine niedrige Reibung während der Umformung empfehlenswert.

Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurden die Prozesse der Referenzzahnräder ZR₃ und Z₁₃ sowie der Zahnräder ZR₀₁, ZR₀₅, ZR₂₁ und ZR₂₅ angepasst. Aus werkzeugseitiger Sicht wurden für die Matrizen die Einlaufradien in der Umformzone vergrößert und zwar im Fall der Geradverzahnung beidseitig sowie für die Schrägverzahnung einseitig, auf der vom Materialfluss abgewandten Seite. Zusätzlich wurde für die schrägverzahnten Matrizen der Schrägungswinkel der Matrizenzähne vorkorrigiert, um die Flankengenauigkeit zu erhöhen. Dies erfolgt in Anlehnung an industrielle Methoden auf Basis der erreichten Flankenwinkel im Experiment für die mit dem konventionellen Verzahnungseinlauf hergestellten Zahnräder.

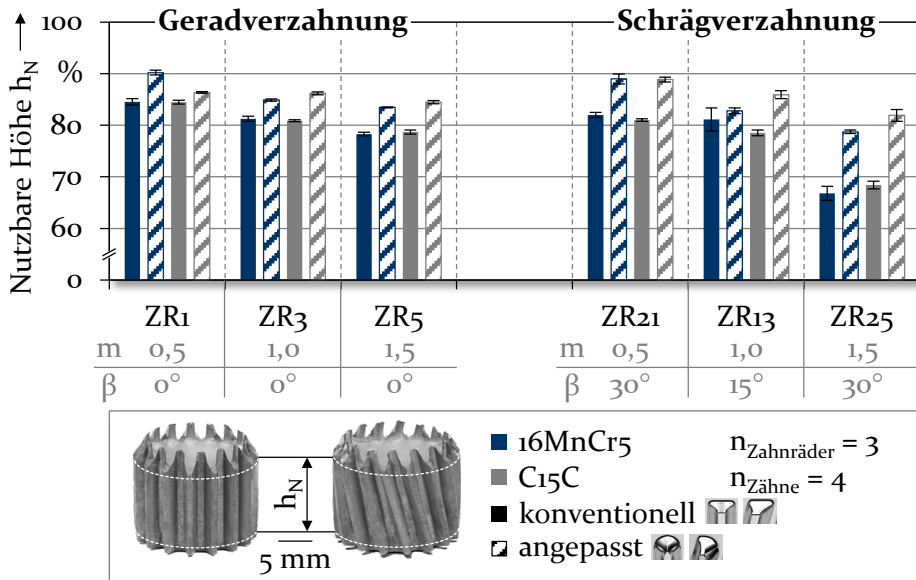
In den Umformversuchen wurde weiterhin das Schmierstoffsystem Phosphatseife eingesetzt. Hierdurch werden vorteilhafte Reibverhältnisse bei gleichzeitig zuverlässiger Trennwirkung von Bauteil- und Werkzeugoberfläche gewährleistet.

Bauteileigenschaften

Der Einfluss der Prozessanpassung wurde bauteilseitig auf die Materialeffizienz und die Verzahnungsgenauigkeit bestimmt. Zudem wurden die mechanischen Eigenschaften durch die Ermittlung der Härteverteilung im Verzahnungsbereich der Bauteile analysiert.

Nutzbare Höhe

Auswirkungen der Werkzeuganpassung wurden auf die nutzbare Höhe h_N der gerad- und schrägverzahnten Zahnräder für beide Stahlsorten ermittelt. In Bild 69 ist ein Vergleich der Werte mit denen für die konventionellen Werkzeugsysteme dargestellt.

Bild 69: Einfluss Werkzeuganpassung (experimentell): Nutzbare Höhe h_N

Für beide Verzahnungsarten bewirkt die angepasste Umformzone eine Zunahme des nutzbaren Verzahnungsbereichs. Im Fall der Geradverzahnung steigt für 16MnCr5 die Materialeffizienz auf rund 90 % (ZR1), 85 % (ZR3) und 84 % (ZR5) an und wird somit im Mittel um etwa 6 % erhöht. Für die Schrägverzahnung wird ein nutzbarer Bereich von rund 89 % (ZR21), 83 % (ZR13) und 79 % (ZR25) erreicht. Die durchschnittliche Erhöhung beträgt über 8 %. Der vergleichsweise hohe Anstieg der nutzbaren Höhe h_N von ZR25 deutet auf eine verbesserte Flankengenauigkeit hin.

Die Steigerung des nutzbaren Anteils der hergestellten Zahnräder ist durch die Reduzierung der Materialflussbehinderung im Verzahnungseinlaufbereich der gerad- und schrägverzahnten Matrizen erklärbar (Bild 63). Im Vergleich zu 16MnCr5 werden für die Stahlsorte C15C tendenziell höhere Werte erzielt. Ein Grund hierfür ist, dass der Effekt der Stoffflusserleichterung für den vergleichsweise geringer verfestigten Werkstoff C15C stärker zum Tragen kommt.

Verzahnungsgenauigkeit

Der Einfluss der angepassten Werkzeugsysteme wurde auf die resultierende Verzahnungsgenauigkeit der Bauteile ermittelt. Die Ergebnisse für die Profilabweichung der geradverzahnten Zahnräder sind in Bild 70 dargestellt.

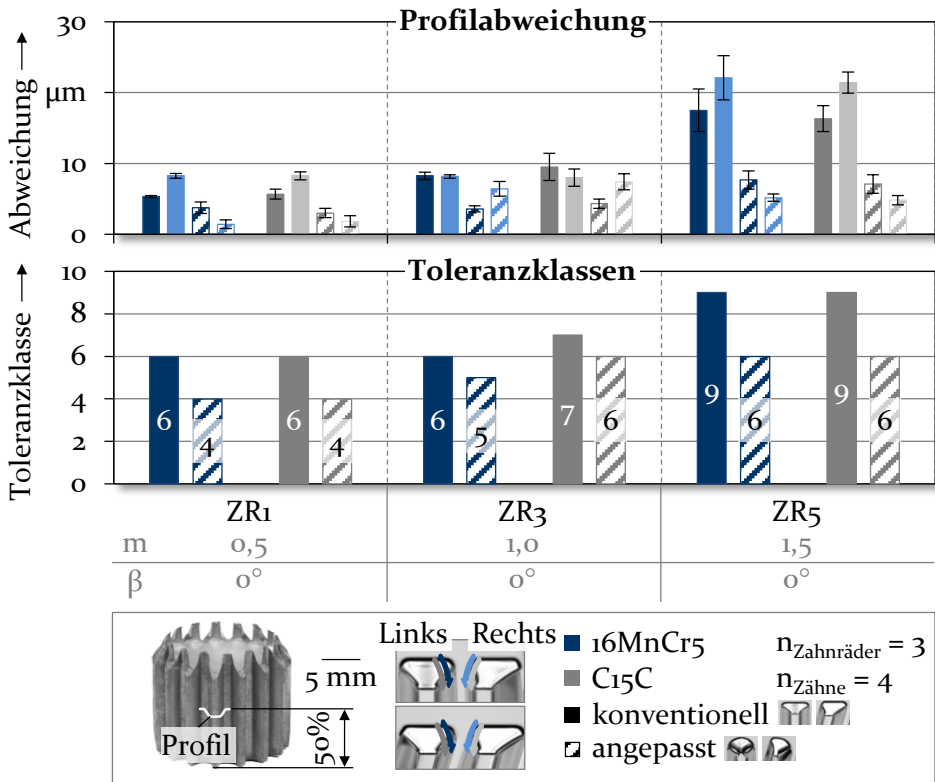


Bild 70: Einfluss Werkzeuganpassung (experimentell): Profilabweichung (ZR1, ZR3 und ZR5)

Die Profilabweichung wird für die Geradverzahnungen durch die Anpassung der Umformzone durchweg verbessert. Die Werte werden im Durchschnitt um etwa 4 µm (ZR1), 3 µm (ZR3) und 13 µm (ZR5) reduziert. Die gewählte Stahlsorte besitzt keinen wesentlichen Einfluss auf die Profilgenauigkeit. Für ZR1 liegen die Werte für die Profilabweichung um zwei Klassen besser im Bereich einer Toleranzklasse von 4. Bei ZR3 werden Werte innerhalb einer Toleranzklasse von 5 bis 6 statt 6 bis 7 erzielt. Im Fall von ZR5 treten Werte im Bereich einer Toleranzklasse von 6 im Vergleich zu 9 auf.

Die Verbesserung der Profilabweichung ist durch die geringere Stoffflussumlenkung im Verzahnungseinlauf zu erklären (Bild 63). Hierdurch wird eine konturnahe Ausformung der Zahnform begünstigt.

Die Profilabweichung und die entsprechenden Toleranzklassen wurden auch für die schrägverzahnenden Zahnäder ermittelt. Die Ergebnisse für 16MnCr5 und C15C sind in Bild 71 zusammengefasst.

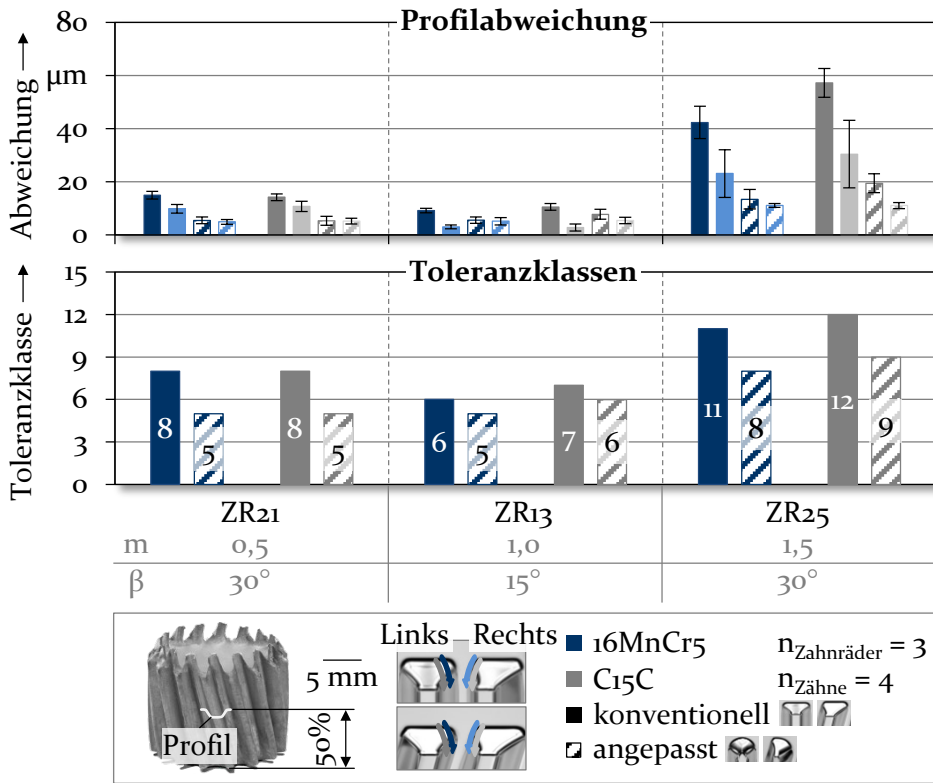


Bild 71: Einfluss Werkzeuganpassung (experimentell): Profilabweichung (ZR21, ZR13 und ZR25)

Auch für die Schrägverzahnungen wird die Profilgenauigkeit durch die Werkzeuganpassung erhöht. Im Mittel werden die Abweichungen um rund 7 µm (ZR21), 3 µm (ZR13) und 25 µm (ZR25) reduziert. Für die verwendeten Zahnradwerkstoffe sind keine merklichen Unterschiede erkennbar. Für ZR21 erreichen die Werte eine Toleranzklasse von 5 statt 8. Im Fall von ZR13 wird die Toleranzklasse von 6 auf 5 (16MnCr5) und 7 auf 6 (C15C) verbessert. Durch die Werkzeuganpassung wird für das schrägverzahnnte Zahnrad ZR25 eine Profilabweichung im Bereich einer Toleranzklasse von 8 bis 9 statt 11 bis 12 erzielt.

Die Steigerung der Formgenauigkeit ist - wie bei den geradverzahnnten Zahnrändern - durch die vorteilhafte Beeinflussung des Stoffflusses in der Umformzone mittels der Werkzeuganpassung begründbar (Bild 63). Durch die Radiuserhöhung wird eine Umlenkung des eintretenden Materials in den Verzahnungsbereich reduziert und damit das Formfüllungsverhalten verbessert.

Zur Bewertung der Verzahnungsgenauigkeit wurde auch die Flankenabweichung der Zahnräder ermittelt. In Bild 72 sind die Ergebnisse für die geradzahnten Zahnräder zu sehen.

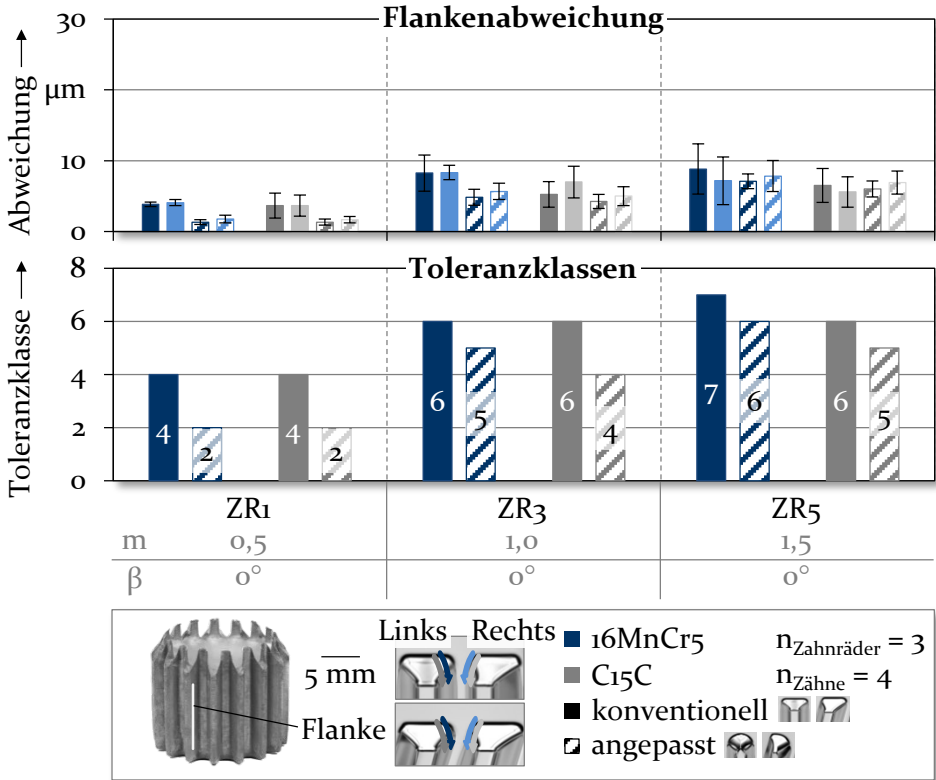


Bild 72: Einfluss Werkzeuganpassung (experimentell): Flankenabweichung (ZR1, ZR3 und ZR5)

Infolge der Werkzeuganpassung wird die Flankengenauigkeit der geradzahnten Zahnräder erhöht. Werte für die Flankenabweichung werden im Mittel um rund 2 µm (ZR1), 3 µm (ZR3) und 1 µm (ZR5) reduziert. Die Abweichungen sind für 16MnCr5 und C15C vergleichbar. Für ZR1 werden Werte im Bereich einer Toleranzklasse von 2 im Vergleich zu 4 ohne modifizierte Umformzone erzielt. Im Fall von ZR13 wird im Mittel eine Toleranzklasse von 4 bis statt 6 erreicht. Die Werte für ZR5 werden um eine Toleranzklasse verbessert, von 7 auf 6 (16MnCr5) und 6 auf 5 (C15C).

Hintergrund für die Steigerung der Flankengenauigkeit ist die Vergrößerung der Einlaufradien im Verzahnungsbereich. Hierdurch wird die Fließbehinderung für den Stofffluss reduziert und die Formfüllung der Verzahnungskavitäten begünstigt (Bild 63).

Der Einfluss der angepassten Werkzeuge wurde auch auf die Flankenabweichung für die Zahnräder mit einer Schrägverzahnung ermittelt. Für die eingesetzten Werkzeuge wurde neben dem Verzahnungseinlauf der Schrägungswinkel der Matrizenzähne vorkorrigiert. Bild 73 fasst die Ergebnisse zusammen.

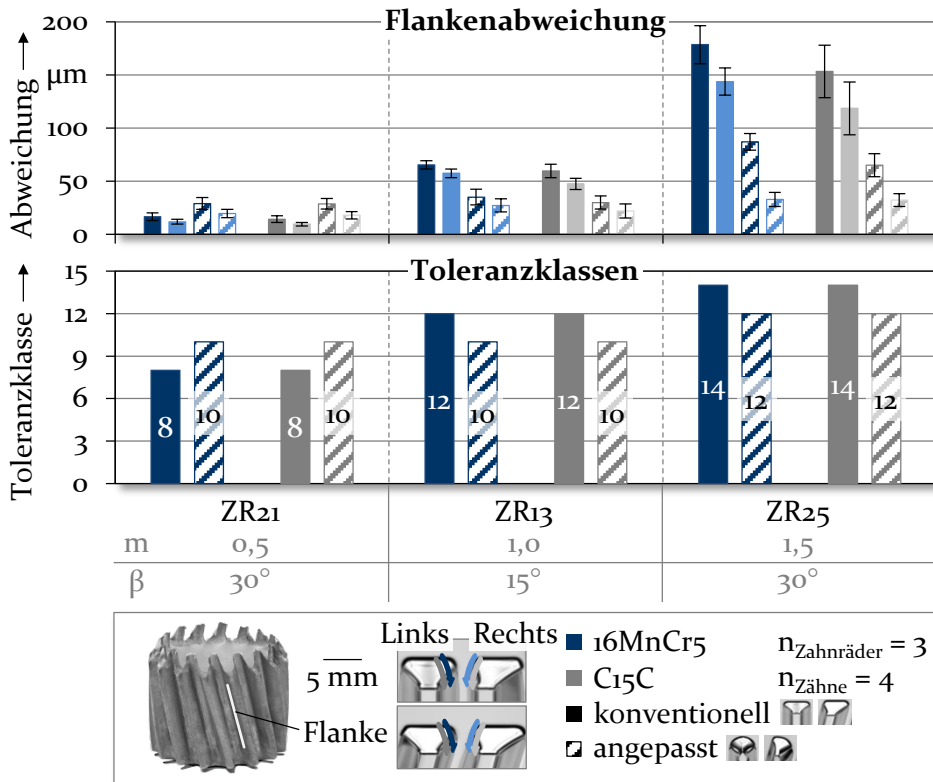


Bild 73: Einfluss Werkzeuganpassung (experimentell): Flankenabweichung (ZR21, ZR13 und ZR25)

Durch die Werkzeuganpassung wird auch die Flankengenauigkeit der schrägverzahnten Zahnräder - außer im Fall von ZR21 - erhöht. Für ZR21 tritt ein Anstieg der Abweichung um rund 13 μm auf. Dagegen werden die Abweichungen für ZR13 um etwa 30 μm und 92 μm für ZR25 reduziert. Für die Flankenabweichung von ZR21 wird eine Toleranzklasse von 10 statt 8 erzielt, wobei der Flankenwinkel für 16MnCr5 29,6° statt 29,8° beträgt. Im Fall von ZR13 liegen die Werte innerhalb einer Toleranzklasse von 9 statt 12. Der Winkel wird von 14,5° auf 14,7° (16MnCr5) erhöht. Für ZR25 wird die Toleranzklasse von 14 auf 12 verbessert. Für den entsprechenden Winkel wird ein Wert von 29,8° im Vergleich zu 29,3° für 16MnCr5 erzielt.

Insgesamt wird die Flankengenauigkeit durch die Werkzeuganpassung für beide Verzahnungsarten verbessert. Im Fall der Schrägverzahnung sind dennoch Abweichungen zu den geforderten Flankenwinkeln erkennbar. Die Vorkorrektur erfolgte basierend auf den Messdaten der hergestellten Zahnräder mit den konventionellen Verzahnungseinläufen. Die Anpassung der Umformzone besitzt einen Einfluss auf das auftretende Verfestigungsverhalten der Zahnräder und die Werkzeugbeanspruchung während der Umformung, wodurch das werkstück- und werkzeugeitige elastische Deformationsverhalten und damit die Flankenwinkel beeinflusst werden. Somit ist eine Vorkorrektur der Matrizenzähne für das jeweilige Prozesssetup individuell zu bestimmen, da die auftretenden Flankenabweichungen aufgrund der komplexen Zusammenhänge und deren Wechselwirkungen während der Umformung - beispielsweise beim Einsatz unterschiedlicher Matrizen - nicht hinreichend übertragbar sind. Dennoch wird gezeigt, dass diese Werkzeugmaßnahme eine geeignete Methode ist, um die Flankengenauigkeit zu beeinflussen. Die Erkenntnisse im Hinblick der Flankenabweichungen sind für die untersuchten Stahlsorten vergleichbar.

Mechanische Eigenschaften

Der Einfluss der Werkzeuganpassung wurde auf die Härteverteilung der Zahnräder im Verzahnungsbereich ermittelt. In Bild 74 wird dieser repräsentativ für den Stahlwerkstoff 16MnCr5 jeweils an einem Zahn in der Bauteilmitte gezeigt.

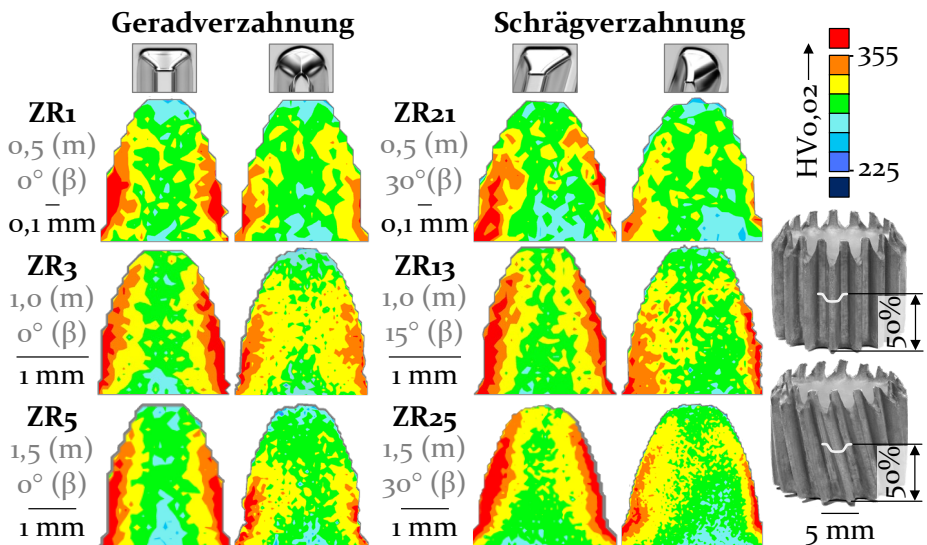


Bild 74: Einfluss Werkzeuganpassung (experimentell): Härteverteilung

Der angepasste Verzahnungsbereich der Matrizen bewirkt unabhängig von der Verzahnungsart eine Abnahme der Härtewerte im Flankenbereich. Im Zahnfußbereich liegt ein vergleichbares Härteniveau vor. Die Ausgangshärte der Stahlsorte 16MnCr5 beträgt 235 ± 10 HV_{0,02}. Innerhalb der untersuchten Modulreihe und Schrägungswinkel sind die Erkenntnisse übertragbar. Bei den Härtemessungen wird die Auflösung durch ein einheitliches Messraster innerhalb der unterschiedlichen Zahngrößen begrenzt.

Die Anpassung der Einlaufzone reduziert die Fließbehinderung für den Materialfluss in die Umformzone und somit die Stoffflussumlenkung. Die Werkstoffverfestigung ist mitunter abhängig von den auftretenden Spannungen [3] und der Formänderung während der Umformung [34], wodurch die Härteabnahme erklärt werden kann. Durch die unterschiedlichen Härteniveaus der hergestellten Zahnräder ohne und mit Werkzeuganpassung ist ein Einfluss auf das elastische werkstück- und werkzeugseitige Deformationsverhalten möglich. Dies bestätigt die Notwendigkeit, dass im Fall von Schrägverzahnungen eine Vorkorrektur der Matrizenzähne spezifisch für das Prozesssetup vorzunehmen ist.

Prozesseigenschaften

Im Hinblick der Prozesseigenschaften wird ein Einfluss der Werkzeuganpassung auf die maximalen Prozesskräfte analysiert. Die Ergebnisse werden in Bild 75 gezeigt.

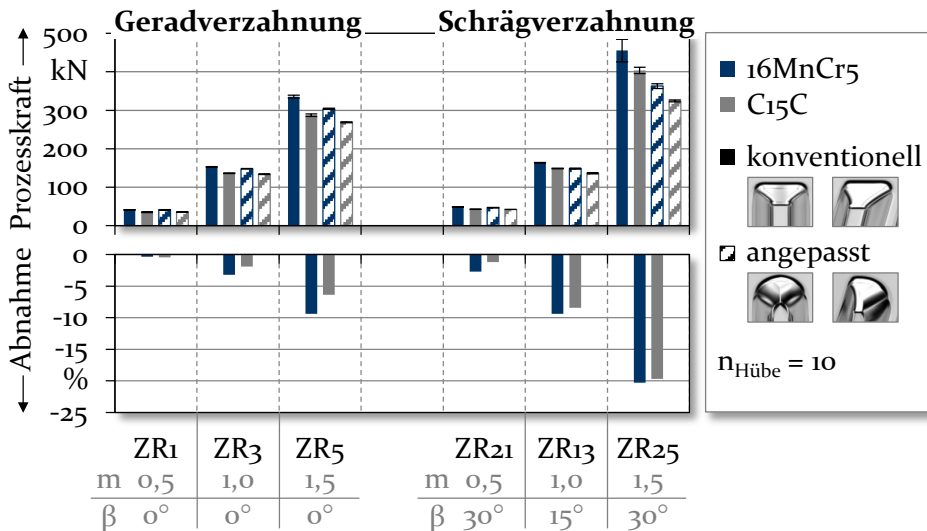


Bild 75: Einfluss Werkzeuganpassung (experimentell): Maximale Prozesskraft

Für beide Verzahnungsarten nehmen die maximalen Prozesskräfte durch die Werkzeuganpassung in der Umformzone ab. Im Fall der Geradverzahnung werden die Werte für den Stahlwerkstoff 16MnCr5 um 0,3 % (ZR1), 3,2 % (ZR3) und 9,4 % (ZR5) reduziert. Für die schrägverzahnenden Zahnräder ist für 16MnCr5 eine Verringerung um 2,7 % (ZR21), 9,4 % (ZR13) und 20,3 % (ZR25) ersichtlich.

Durch die Anpassung der Umformzone wird die Fließbehinderung für den eintretenden Stofffluss in den Verzahnungseinlauf verringert (Bild 63), was Auswirkungen auf die resultierende Werkstoffverfestigung und damit die benötigten Prozesskräfte hat. Für die Herstellung von Schrägverzahnungen wird durch die Vergrößerung der Einlaufradien die Fließbehinderung des Materialflusses stärker reduziert, was ein Grund für die vergleichsweise höhere Reduktion der erforderlichen Prozesskräfte ist.

Eine Erklärung für das unterschiedliche Niveau der Prozesskraftabnahme innerhalb der untersuchten Modulreihe - unabhängig von der Verzahnungsart - ist ein auftretender Skaleneffekt unter Berücksichtigung der hohen Unterschiede in den makroskopischen Abmessungen der Bauteile (Bild 76).

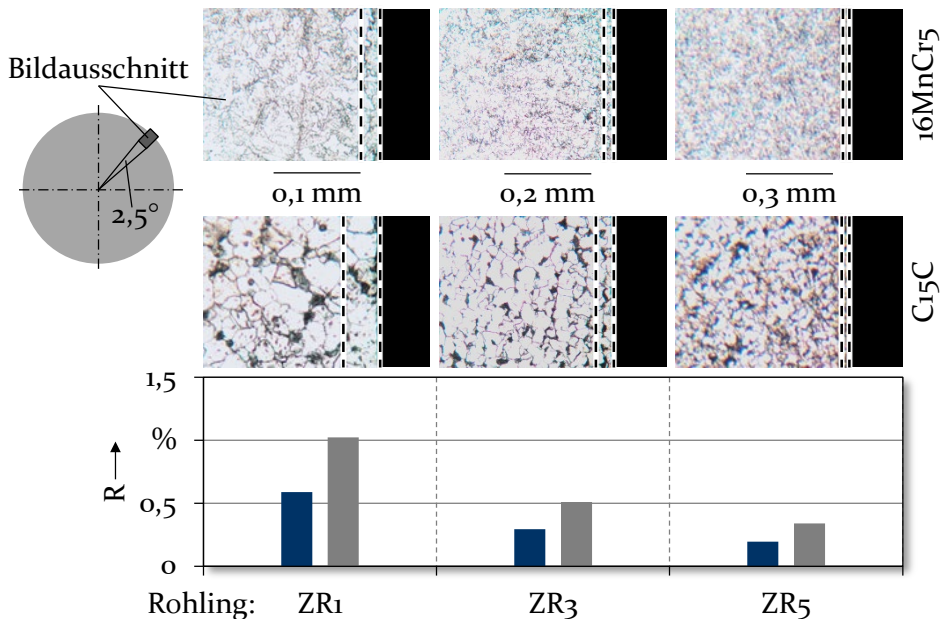


Bild 76: Skaleneffekt innerhalb der Modulreihe: Zunehmender Anteil der Randschicht an der Gesamtquerschnittsfläche

Bei den untersuchten Moduln im Intervall von 0,5 bis 1,5 mm steigt der prozentuale Flächenanteil von Randkörnern im Bauteilquerschnitt an, was exemplarisch anhand von Gefügeaufnahmen der Rohlinge für ZR₁, ZR₃ und ZR₅ gezeigt wird. Um diesen Zusammenhang zu veranschaulichen, repräsentieren die Bildausschnitte jeweils 2,5°-Segmente. In Abhängigkeit des Probendurchmessers ergibt sich die absolute Bildgröße entsprechend dem Winkel (2,5°), wodurch der Bildausschnitt relativ zur Querschnittsfläche konstant ist.

Zur Quantifizierung wird auf Basis der mittleren Korngröße von 16MnCr₅ und C₁₅ der Parameter R berechnet. Diese Größe gibt das Verhältnis der Fläche der jeweiligen Randkornschicht ($A_{\text{Randkörner}}$) zur Querschnittsfläche ($A_{\text{Querschnitt}}$) des Rohlings an (2).

$$R = \frac{A_{\text{Randkörner}}}{A_{\text{Querschnitt}}} \quad (2)$$

Der R-Wert wird mit steigender Probengröße von 0,6 % auf 0,2 % für 16MnCr₅ und bei C₁₅C von 1,0 % auf 0,3 % reduziert. Ein zunehmender Randkornanteil bewirkt eine geringere Fließspannung, wodurch die Umformbarkeit verbessert und erforderliche Prozesskräfte reduziert werden [201]. Dieser Skaleneffekt tritt auch beim Kaltfließpressen der Zahnräder mit der konventionellen Matrizenvariante auf und ist eine Erklärung, weshalb für kleinere Zahnradmoduln durch die angepasste Umformzone die Kraftreduzierung vergleichsweise geringer ist. Die verbesserte Umformbarkeit des Werkstoffs aufgrund des steigenden Kornanteils im Querschnitt überlagert somit den Effekt einer geringeren Fließbehinderung für den eintretenden Materialfluss in den Verzahnungsbereich der Matrizen.

Die prozentuale Abnahme der Umformkräfte ist bei 16MnCr₅ im Vergleich zu C₁₅C tendenziell etwas höher. Dies ist auf den vergleichsweise größeren Flächenanteil der Randkörner zur Querschnittsfläche zurückzuführen.

Der Einfluss des Werkstoffgefüges wird in Simulationen nicht berücksichtigt. Hierdurch sind Unterschiede zwischen den experimentell und numerisch vorhergesagten maximalen Prozesskräften für die Anpassung der Werkzeuge erklärbar.

8 Empfehlungen für die Zahnradherstellung

Zur Schaffung eines grundlegenden Prozessverständnisses und für die Ableitung von praxisrelevanten Empfehlungen für die Zahnradherstellung im „Samanta“-Verfahren werden in einem numerisch-experimentell kombinierten Ansatz Zusammenhänge abgeleitet. Diese werden innerhalb einer Einflussmatrix für den jeweiligen Betrachtungsfall systematisch zusammengefasst. Zudem werden die erforschten Erkenntnisse vor dem Hintergrund eines praxisbezogenen Nutzens bewertet und Auslegungshinweise bereitgestellt. Als relevante Bauteileigenschaften wurden die Materialeffizienz, die Verzahnungsgenauigkeit und die Verfestigung der Zahnräder betrachtet. Aus Prozesssicht wurden die bei der Herstellung der Bauteile erforderlichen Prozesskräfte und die auftretende maximale Werkzeugbeanspruchung in der Umformzone der Matrizen analysiert.

8.1 Erarbeitung eines Prozessverständnisses

Ziel ist es, Zusammenhänge hinsichtlich des Einflusses der untersuchten Zahnradparameter auf das Prozessergebnis abzuleiten. Im Fokus stehen Erkenntnisse über Potentiale und Grenzen für die kaltfließpresstechnische Herstellung von Zahnrädern im „Samanta“-Verfahren. Von besonderem Interesse ist eine vergleichende Betrachtung innerhalb von Gerad- und Schrägverzahnungen. In Bild 77 sind die Erkenntnisse über den Einfluss der Zähnezahl sowie von Modul und Schrägungswinkel auf die resultierenden Bauteil- und Prozesseigenschaften zusammengefasst.

8.1.1 Zähnezahl

Zur Ermittlung von Auswirkungen der Zähnezahl auf das Prozessergebnis wurden fünf Stufen im Intervall von 16 bis 20 Zähnen analysiert. Hierzu erfolgten numerische Untersuchungen anhand der gerad- und schrägverzahnten Referenzzahnräder (ZR₃ und ZR₁₃). Um eine Vergleichbarkeit innerhalb der untersuchten Varianten zu gewährleisten, wurde ein konstantes Breiten-Durchmesserverhältnis gewählt.

Bauteileigenschaften

Nutzbare Höhe

Als wichtige Bauteileigenschaft wird die Materialeffizienz durch Ermittlung der nutzbaren Höhe h_N quantifiziert. Bei beiden Verzahnungsarten

ist für eine steigende Zähnezahl eine geringe Abnahme der nutzbaren Anteile feststellbar, was auf einen begünstigten Materialfluss im Mittenbereich der Bauteile zurückzuführen ist.

Bewertungskriterien			Zahnradparameter (*SVZ)			
			ZZ↑	m↑	β↑	
Bauteileigenschaften	Nutzbare Höhe					
	Profilabweichung	Absolut				
		Relativ	-			
	Flankenabweichung	Absolut	/			
		Relativ	-			
	Verfestigung	Zahnfußbereich				
Integral						
Prozesseigenschaften	Prozesskraft	Maximal				
		Relativ				
	Werkzeugbeanspruchung	σ _{v.Mises}	Links			
			Mitte			
			Rechts			
		σ _{Max}	Links			
			Mitte			
			Rechts			
	σ _{Min}	Links				
		Mitte				
Rechts						

Bild 77: Forschungserkenntnisse - Prozessverständnis

Verzahnungsgenauigkeit

Die resultierende Profilabweichung, welche die erzielte Formgenauigkeit der Zahnkontur beschreibt, ist unabhängig von der Zähnezahl. Die Flankenabweichung wird für Geradverzahnungen nicht durch die Zähnezahl beeinflusst, wohingegen im Fall von Schrägverzahnungen die Abweichung des Flankenwinkels mit zunehmender Zähnezahl geringer ist. Dies ist mitunter auf die Beeinflussung der Verfestigung durch eine steigende Bauteilgröße zurückzuführen.

Verfestigung

Bei Zahnrädern mit mehr Zähnen wird das integrale Verfestigungsniveau reduziert, da aufgrund größerer Bauteilabmessungen der Anteil an Zonen – insbesondere im Bauteilkern – mit vergleichsweise geringer Verfestigung zunimmt (Bild 28). Zudem begünstigt dies im Verzahnungsbereich eine homogenere Verteilung und einen Abbau der auftretenden Spannungen während des Kaltfließpressens, wodurch Umformgrade in dieser Zone mit steigender Zähnezahl sinken.

Prozesseigenschaften

Prozesskräfte

Prozessseitig wurde der Einfluss auf die maximalen und relativen Prozesskräfte sowie der auftretenden Werkzeugbeanspruchung in versagenskritischen Matrizenbereichen untersucht. In Bezug auf die Prozesskräfte resultieren unabhängig von der Verzahnungsart infolge steigender Zähnezahlen respektive Bauteilgröße höhere maximale Prozesskräfte. In Anbetracht der relativen Prozesskraft, die eine volumenunabhängige Bewertung des erforderlichen Kraftbedarfs ermöglicht, sind Zahnräder mit mehr Zähnen vergleichsweise energieeffizienter herstellbar. Dieser Effekt resultiert durch die Abnahme des integralen Verfestigungsniveaus mit steigender Zähnezahl (Bild 28).

Werkzeugbeanspruchung

Für die maximale Werkzeugbeanspruchung wird kein wesentlicher Einfluss auf die auftretenden Spannungen in den untersuchten Bereichen in der Umformzone identifiziert. Grund hierfür ist, dass die auf den einzelnen Matrizenzahn wirkenden Kräfte während der Umformung nahezu konstant bleiben.

8.1.2 Modul und Schrägungswinkel

Der Einfluss der Zahnradparameter Modul und Schrägungswinkel auf das Prozessergebnis wurde in der Numerik in fünf Stufen untersucht, wobei der Modul im Intervall 0,5 bis 1,5 mm und der Winkel von 0° bis 30° variiert wurde. Das Breiten-Durchmesser Verhältnis der Zahnräder wurde konstant gehalten. Ausgewählte Zahnräder - die Eckpunkte des Parameterraums - wurden zusätzlich in Umformversuchen hergestellt. Im untersuchten Parameterraum wurde die kaltfließpresstechnische Herstellbarkeit der gewählten Zahnradgeometrien nachgewiesen. Ferner sind die Erkenntnisse hinsichtlich zugrundeliegender Zusammenhänge und

Mechanismen innerhalb der verwendeten Stahlwerkstoffe vergleichbar, wobei absolute Unterschiede durch die materialspezifischen Festigkeiten resultieren.

Bauteileigenschaften

Nutzbare Höhe

Bauteilseitig wird die nutzbare Höhe h_N der Zahnräder infolge steigender Zahnradmoduln und Schrägungswinkel reduziert. Somit folgt die höchste Materialeffizienz für geradverzahnte Zahnräder mit geringen Moduln. Jedoch fällt für größere Moduln in der Regel mehr Zerspanungsvolumen an, was für die umformtechnische Herstellung von Vorteil ist.

Verzahnungsgenauigkeit

Bei Betrachtung der Bauteileigenschaften innerhalb von Gerad- und Schrägverzahnungen bedingt die Ausformung eines Schrägungswinkels eine asymmetrische Eigenschaftsverteilung, die mit zunehmenden Winkeln verstärkt wird. Dieser Effekt ist bei der Analyse der Verzahnungsgenauigkeit und Härte zu erkennen. Für steigende Zahnradmoduln nimmt die Verzahnungsgenauigkeit ab, wodurch höhere Toleranzklassen auftreten (Bild 78).

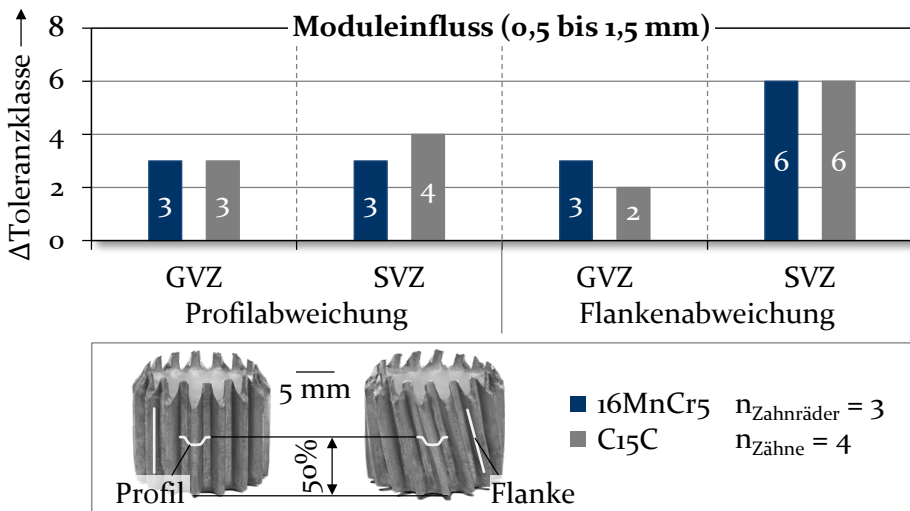


Bild 78: Verzahnungsgenauigkeit: Einfluss des Moduls auf die Toleranzklasse

Im Hinblick der erzielten Profilabweichungen werden durch die Modul-erhöhung von 0,5 mm auf 1,5 mm die Toleranzklassen um 3 bis 4 erhöht. Auch auf die Toleranzklassen der erreichbaren Flankengenauigkeit hat der Modul einen negativen Einfluss. Für geradverzahnte Zahnräder

werden diese um 2 bis 3 verschlechtert. Aufgrund eines vergleichsweise höheren werkstück- und werkzeugseitigen Deformationsverhalten bei der Herstellung von Schrägverzahnungen, nehmen durch die Modulsteigerung die Toleranzklassen um 6 zu.

Über den Einfluss des Schrägungswinkels auf die Verzahnungsgenauigkeit ist in den Untersuchungen festgestellt worden, dass im direkten Vergleich von Gerad- und Schrägverzahnungen bei konstantem Modul geradverzahnte Zahnräder präziser kaltfließpresstechnisch fertigbar sind. In Bezug auf die Profilgenauigkeit werden durch die Zunahme des Schrägungswinkels von 0° auf 30° die Toleranzklassen um bis zu 3 erhöht. Im Fall der Flankenabweichungen nehmen diese sogar um mitunter 8 Toleranzklassen zu.

Verfestigung

In Bezug auf die Verfestigung sind auftretende Härtewerte innerhalb der untersuchten Modulreihe im Zahnfußbereich auf einem vergleichbaren Niveau. Für Zahnräder mit größeren Moduln nimmt das integrale Verfestigungsniveau ab, da der Anteil an Zonen - insbesondere im Bauteilkern - mit vergleichsweise geringerer Verfestigung steigt. Aufgrund der stärkeren Materialumlenkung bei der Herstellung von Schrägverzahnung treten im Zahnfußbereich und im Verzahnungsquerschnitt etwas höhere Härtewerte auf. Insgesamt wird durch die Umformung eine Verfestigung erreicht, wodurch für geringer beanspruchte Einsatzbedingungen der Zahnräder eine dem Umformprozess nachgeschaltete Wärmebehandlung vermeidbar ist [32].

Prozesseigenschaften

Prozesskräfte

Im Hinblick der Prozesseigenschaften erfordert die Umformung größerer Zahnradmoduln aufgrund steigender Bauteilvolumina höhere Prozesskräfte. Ebenfalls wird durch den Schrägungswinkel das Volumen etwas erhöht, wodurch Kraftmaxima zunehmen. Bei einer volumenunabhängigen Analyse der erforderlichen Kräfte sind Zahnräder mit größeren Moduln vergleichsweise energieeffizienter herstellbar, da der Anteil an Bereichen mit geringerer Verfestigung zunimmt und damit die integrale Verfestigung reduziert wird. Im direkten Vergleich der Verzahnungsarten sind auch schrägverzahnte Zahnräder aufgrund niedrigerer relativer Prozesskräfte energieeffizienter fertigbar, was auf die geringere Kontakt- und damit Reibfläche während der Umformung zurückzuführen ist.

Werkzeugbeanspruchung

Die maximale Werkzeugbeanspruchung ist innerhalb der Verzahnungsarten durch eine wesentliche Charakteristik gekennzeichnet. Die Ausformung eines Schrägungswinkels bedingt aufgrund des Kontaktdrucks des Werkstoffs auf den seitlichen Matrizenzahn eine asymmetrische Spannungsverteilung und in der Folge eine lokal unterschiedliche Beanspruchungssituation (Bild 21). Für geradverzahnte Matrizen ist unabhängig vom Modul der Schulterbereich, aufgrund eines durch den Stofffluss hervorgerufenen Biegemoments, die versagenskritische Werkzeugzone. Im Fall von schrägverzahnten Matrizen - insbesondere für Winkel $\geq 15^\circ$ - wird die kritische Zone in die seitlichen Bereiche des Matrizenzahns verlagert. Matrizen mit Flankenwinkeln im Bereich von 20° bis 30° sind aufgrund dieser zusätzlichen seitlichen Werkstoffbelastung als höchstbeansprucht einzustufen. Im Detail haben die Zahnradparameter folgenden Einfluss auf die untersuchten Spannungskomponenten in den untersuchten Werkzeugzonen:

Eine Modulerhöhung hat einen vorteilhaften Einfluss auf das Beanspruchungsniveau im Schulterbereich, was zu einer homogeneren Spannungsverteilung und einem besseren Spannungsabbau führt. Dies ist insbesondere für geradverzahnte Matrizen vorteilhaft, da die Reduzierung nicht im wie im Fall von Schrägverzahnungen durch Kerb- oder Zugspannungen im Seitenbereich überlagert wird. Dieser Effekt tritt im untersuchten Parameterraum für Matrizen mit Winkeln ab etwa $7,5^\circ$ auf. Auch wird für größere Zahnradmoduln die Werkzeugherstellung erleichtert, da bei einer geringen Bauteildimension eine hohe Präzision der Verzahnungskontur vergleichsweise anspruchsvoller zu erreichen ist [16]. In den seitlichen Matrizenbereichen ist für unterschiedliche Moduln kein wesentlicher Einfluss auf die untersuchten Spannungskomponenten feststellbar.

Die Herstellung von Schrägverzahnungen resultiert in einem zusätzlichen Biegemoment und bewirkt Spannungskonzentrationen sowie kritische Zug- und Druckbeanspruchungen im Seitenbereich der Matrizenzähne. Für Winkel $\geq 15^\circ$ übertreffen die Spannungen $\sigma_{v.Mises}$ und σ_{Max} die im Schulterbereich auftretenden Werte. Auch in Bezug auf die resultierende Druckbeanspruchung (σ_{Min}) werden im rechten Seitenbereich mit zunehmenden Winkeln durchweg höhere Spannungen erreicht.

8.2 Ableitung von Auslegungshinweisen

Die Erforschung und Bewertung von Maßnahmen des tribologischen Systems zur vorteilhaften Beeinflussung des Prozessergebnisses ist von wesentlicher Bedeutung, um das Potential des „Samanta“-Verfahren für das Kaltfließpressen von Zahnrädern zu steigern. Auf Grundlage dessen ist die Bereitstellung von entsprechenden Auslegungshinweisen für den Anwender von wesentlicher Bedeutung. Vor dem Hintergrund eines praktischen Nutzens wird der Einfluss der numerisch und experimentell analysierten Methoden in Bild 79 zusammengefasst.

Bewertungskriterien			Einlaufradius↑		Reibung↑	
			GVZ	SVZ	GVZ SVZ	
Bauteileigenschaften	Nutzbare Höhe		↑	↑	→	
	Profilabweichung	Absolut	↓	↓	→	
		Relativ	↓	↓	→	
	Flankenabweichung	Absolut	↙	↙	→	
		Relativ	↙	↙	→	
	Verfestigung	Zahnfußbereich	→	→	↗	
Integral		↘	↘	-		
Prozesseigenschaften	Prozesskraft	Maximal	↓	↓	↗	
	Werkzeugbeanspruchung	$\sigma_{v.Mises}$	Links	↓	↗	↗
			Mitte	↓	↓	↗
			Rechts	↓	↓	↗
		σ_{Max}	Links	→	↗	↗
			Mitte	↙	↗	↗
			Rechts	→	→	↗
	σ_{Min}	Links	↓	↗	↗	
		Mitte	↙	↙	↗	
		Rechts	↓	↓	↗	

Bild 79: Forschungserkenntnisse - Prozessanpassung

8.2.1 Werkzeugtechnik

Für die eingesetzten Werkzeuge wurde der Einfluss einer Anpassung der Umformzone auf das Prozessergebnis untersucht. Hierzu wurden die Radien im Verzahnungseinlauf erhöht, um die Fließbehinderung für den auftretenden Stofffluss zu reduzieren. Für die geradzahnten Matrizen werden beide Zahnseiten angepasst, wohingegen für die Schrägverzahnung nur die vom Materialfluss abgewandte Seite modifiziert wird.

Bauteileigenschaften

Nutzbare Höhe

Die Werkzeuganpassung in der Umformzone verbessert die nutzbare Höhe h_N der Zahnräder, was auf die Erleichterung des Stoffflusses in die Verzahnungskavitäten zurückzuführen ist. Im Fall der geradzahnten Zahnäder wird der nutzbare Anteil durchschnittlich um rund 6 % für 16MnCr5 und etwa 9 % für C15C erhöht. Für die schrägverzahnnten Zahnäder wird im Mittel eine Erhöhung um rund 8 % für 16MnCr5 und 11 % für C15C erreicht. Das Potential der kaltfließpresstechnischen Herstellung von Zahnädern im Sinne der Materialeffizienz im Vergleich zu konkurrierenden spanenden Herstellungsverfahren ist in Bild 80 dargestellt.

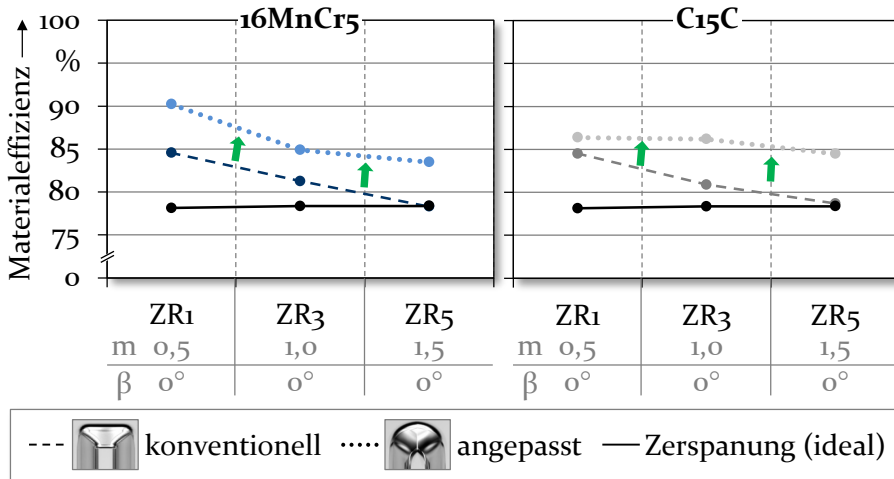


Bild 80: Materialeffizienz: Vergleich konventionelle und angepasste Werkzeuge mit Zerspanung

Gezeigt werden die experimentellen Daten des nutzbaren Verzahnungsanteils der hergestellten geradzahnten Zahnäder aus 16MnCr5 und C15C. Die erzielten Werte der nutzbaren Höhe h_N werden zwischen den nach Literatur und empirischem Praxiswissen ausgelegten Werkzeugen

und denen mit einer angepassten Umformzone differenziert. Diesen werden repräsentative Werte hinsichtlich der erreichbaren Materialeffizienz durch Zerspanungsprozesse für die entsprechenden Zahnräder gegenübergestellt. In diesem Kontext wird das Zerspanungsvolumen idealisiert auf das abzutragende Material in den Zahnücken bezogen. Für zunehmende Zahnradmoduln steigt das idealisierte Zerspanungsvolumen an. Beim Kaltfließpressen wird für größere Moduln eine geringere Materialeffizienz erreicht, wobei das Niveau der mit konventionellen Werkzeugen hergestellten Zahnräder vergleichbare Werte zur Zerspanungstechnik erreicht. Durch die Anpassung der Umformzone der Matrizen wird die Materialeffizienz für beide Stahlwerkstoffe verbessert. Diese Erkenntnisse sind auch auf die Herstellung von Schrägverzahnungen übertragbar.

Verzahnungsgenauigkeit

Durch die Geometrieangepassung der Matrizen wird die erzielbare Formgenauigkeit der Zahnkontur unabhängig von Verzahnungsart und Werkstoff erhöht. Für die kaltfließgepressten Zahnräder wird die Profilabweichung um etwa zwei Toleranzklassen verbessert und verspricht einen anwendungsgerechteren Einsatz. Insbesondere für Zahnräder mit größerem Modul hat sich die Werkzeuganpassung als besonders effektiv erwiesen. Die erreichten Toleranzklassen sind nun vergleichbar mit denen für Zahnräder mit geringerem Modul.

Auch wird die Flankengenauigkeit für Geradverzahnungen erhöht, wobei die erreichten Werte um bis zu zwei Toleranzklassen verbessert werden. Im Fall der Schrägverzahnung wurde in den numerischen Untersuchungen nachgewiesen, dass durch die Vergrößerung des Einlaufradius die Flankengenauigkeit nicht hinreichend beeinflusst werden kann. Die auftretenden Abweichungen des Schrägungswinkels vom Zielwert sind unter anderem durch das werkstück- und werkzeugseitige elastische Deformationsverhalten zu erklären. Im Experiment wird durch die Vorkorrektur der Matrizenzähne anhand der Messdaten der hergestellten Zahnräder mit den konventionellen Verzahnungseinläufen gezeigt, dass diese Maßnahme zur Reduzierung der Flankenabweichung nutzbar ist. Noch bestehende Abweichungen sind auf die simultane Anpassung der Umformzone und die Vorkorrektur der Matrizenzähne zurückzuführen. Die Anpassung des Verzahnungseinlaufbereichs hat Auswirkungen auf die Härteverteilung der Zahnräder sowie die Beanspruchungssituation der Werkzeuge während des Kaltfließpressens, wodurch auftretende elastische Deformationen des Bauteils und Werkzeugs beeinflusst werden. Es ist somit notwendig, eine entsprechende Vorkorrektur der Matrizenzähne

für das gewählte Prozesssetup und -system individuell zu bestimmen, da aufgrund der anspruchsvollen Umformbedingungen sowie der komplexen Zusammenhänge und deren Wechselwirkungen die Abweichung des Schrägungswinkels kaum prognostizierbar ist. Hierfür ist der spezifische Wert für die Vorkorrektur auf Basis von Verzahnungsmessungen für Zahnräder, die innerhalb möglichst stationärer Umformbedingungen während des Prozesses hergestellt wurden, zu entnehmen.

Verfestigung

Durch die Werkzeuganpassung bleiben die Härtewerte im Zahnfußbereich der Bauteile auf einem vergleichbaren Niveau. Im Verzahnungsquerschnitt treten insgesamt etwas geringere Härtewerte auf, da durch die geometrische Anpassung die Fließbehinderung des Materialflusses in die Umformzone und damit die Werkstoffumlenkung reduziert werden.

Prozesseigenschaften

Prozesskräfte

Die Vergrößerung der Einlaufradien reduziert aufgrund eines geringeren Fließwiderstands des Materials die maximalen Prozesskräfte. Dies führt unmittelbar zur Abnahme der integralen Werkzeugbeanspruchung während des Kaltfließpressens. Im Sinne der Ressourceneffizienz ist ein niedrigerer Energieeinsatz möglich, wodurch gleichzeitig die Wirtschaftlichkeit des Umformprozesses steigt. Innerhalb der untersuchten Modulreihe tritt ein Skaleneffekt auf, wonach für zunehmende Moduln die Reduzierung der Prozesskraft steigt.

Werkzeugbeanspruchung

Die Anpassung des Werkzeuglayouts in der Umformzone verringert für beide Verzahnungsarten das Beanspruchungsniveau der Matrizen und besitzt folglich einen vorteilhaften Einfluss. Grund hierfür ist, dass durch Anpassung der Umformzone der Matrizen die Umlenkung des Stoffflusses beim Eintritt in den Verzahnungsbereich verringert wird. Dies hat eine Reduzierung der Kräfte zur Folge, wodurch niedrigere Spannungen im Werkzeug hervorgerufen werden (Bild 63). Diese Erkenntnis ist aus den numerischen Untersuchungen für die Prozesse der Referenzzahnäder (ZR₃ und ZR₁₃) ableitbar.

Die auftretende Werkzeugbeanspruchung ist im Fall der Geradverzahnung durch eine symmetrische Spannungsverteilung charakterisiert. Konträr dazu bedingt die Ausformung eines Schrägungswinkels einen ungleichmäßigen Spannungszustand. Insbesondere für die geradverzahn-

Matrize wurde ein vorteilhafter Einfluss auf die Spannungskomponenten in den versagensrelevanten Werkzeugbereichen identifiziert. Kerbspannungen sowie maximale Zug- und Druckbeanspruchungen werden verringert.

In der Umformzone der schrägverzahnten Matrize werden Konzentrationen der Vergleichsspannung ($\sigma_{v,Mises}$) reduziert. Die Anpassung der Einlaufradien bewirkt eine Vergrößerung der Kontaktfläche und damit einen zunehmenden Kontaktdruck in der Umformzone der Matrize. Dies bedingt ein zusätzliches Biegemoment und einen Anstieg der Spannungskonzentrationen im linken Seitenbereich des Matrizenzahns. Hierdurch werden seitlich der Schulterzone Zugspannungen (σ_{Max}) induziert. Auftretende Druckbeanspruchungen (σ_{Min}) sind im Schulter- und im rechten Seitenbereich reduzierbar, wohingegen im linken Seitenbereich Druckspannungswerte steigen. Dieser Effekt ist für Schrägungswinkel $\geq 15^\circ$ als zunehmend kritischer zu sehen. In diesem Kontext liegt ein Zielkonflikt bei der Herstellung von entsprechenden schrägverzahnten Zahnrädern vor, da mit einer Vergrößerung der Einlaufradien auf die maximale konstruktive Größe die Werkzeugbeanspruchung steigt, jedoch eine Verbesserung der Bauteilgenauigkeit möglich ist. Vor diesem Hintergrund ist die Festlegung der Radiusvergrößerung in der Umformzone spezifisch für den Anwendungsfall in Bezug auf Bauteilgenauigkeit oder Werkzeugstandmenge empfehlenswert. Die verwendeten Radien für die Anpassung des Verzahnungseinlaufbereichs der Matrizen in Abhängigkeit der Zahnradparameter Modul und Schrägungswinkel sind in Bild 81 dargestellt.

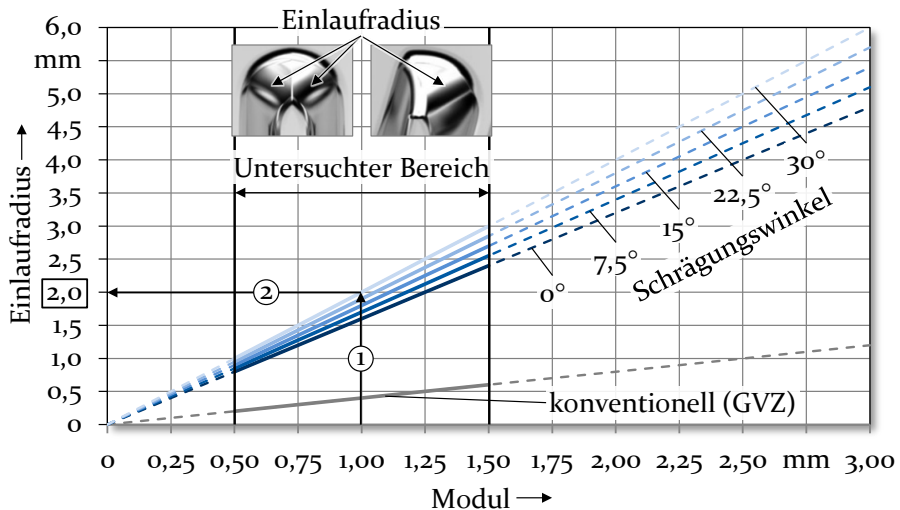


Bild 81: Angepasster Verzahnungseinlaufradius in Abhängigkeit von Modul und Schrägungswinkel

Entsprechend Modul und Schrägungswinkel des herzustellenden Zahnrad sind die spezifischen Werte für die maximale konstruktive Größe des Verzahnungseinlaufradius ablesbar. Repräsentativ ist eine Vergleichslinie der Radiusgröße für den konventionellen Verzahnungseinlauf am Beispiel der Geradverzahnung gegenübergestellt. Für modifizierte Zahnkonturen mit einer Profilverschiebung ist eine Beeinflussung der Werte für die Radien möglich. Aufbauend auf dem in dieser Arbeit untersuchten Parameterraum ist eine exemplarische Fortführung für weitere Modulvarianten ($< 0,5$ mm und $> 1,5$ mm) dargestellt. Eine Übertragbarkeit der erforschten Erkenntnisse hinsichtlich einer vorteilhaften Beeinflussung des Prozessergebnisses durch eine Anpassung der Umformzone der Matrizen für den untersuchten auf den erweiterten Bereich ist denkbar, jedoch durch die bisherigen Untersuchungen nicht verifiziert.

Matrizenquerteilung

Eine Querteilung der eingesetzten Matrizenkerne zur Verbesserung der Zugänglichkeit während des Werkzeugherstellungsprozesses ist empfehlenswert. Für eine effektive Reduzierung versagenskritischer Spannungen ist diese Nahe dem Schultereinlaufradius auszulegen, wobei auf empirische Literaturwerte zurückgegriffen werden kann. Für eine industrielle Anwendung ist neben der radialen auch eine axiale Vorspannung der querteilten Matrizen vorzusehen, um einen Materialfluss in die Teilung zu verhindern.

8.2.2 Wirkfuge

Die tribologischen Bedingungen während des Kaltfließpressens beeinflussen das Prozessergebnis. Um gezielt Anforderungen an das Schmier-system beim Kaltfließpressen von Zahnradern im „Samanta“-Verfahren hinsichtlich einer vorteilhaften Reibung zu formulieren, wurden in numerischen Analysen unterschiedliche Reibbedingungen und deren Einfluss untersucht. Ausgehend von dem im DCE-Test ermittelten Reibfaktor, wurde dieser in fünf Stufen variiert, um ein niedrigeres und höheres Reibniveau nachzubilden.

Bauteileigenschaften

Die auftretende Reibung hat keinen wesentlichen Einfluss auf die nutzbare Höhe h_N und die Bauteilgenauigkeit. Mit zunehmender Reibung werden die resultierenden Umformgrade im randnahen Bereich der Bauteile etwas gesteigert, was durch die Erhöhung auftretender Reibschubspannungen während der Umformung zu erklären ist.

Prozesseigenschaften

Ein Anstieg der Reibung bedingt unmittelbar höhere erforderliche Prozesskräfte. Daneben werden in den untersuchten Werkzeugbereichen sämtliche auftretende Spannungen erhöht und damit die Werkzeugbeanspruchungssituation verschlechtert.

Aus diesen Erkenntnissen ist ableitbar, dass die tribologischen Bedingungen keine nutzbare Methode zur Stoffflusssteuerung ist, um damit die Materialeffizienz und Formgenauigkeit der Bauteile zu verbessern. Ferner bedingt eine hohe Reibung einen Anstieg der Prozesskräfte und Beanspruchung der Matrizen. Vor diesem Hintergrund ist für das Kaltfließpressen von Zahnrädern im „Samanta“-Verfahren eine geringe Reibung während der Umformung empfehlenswert.

8.2.3 Werkstück

Im Allgemeinen ist für die eingesetzten Rohlinge ein axiales Aufmaß vorzusehen, um die nicht nutzbaren stirnseitigen Bauteilbereiche der kaltfließgepressten Zahnräder zu kompensieren. Bei der Auslegung des Breiten-Durchmesser-Verhältnisses der Zahnräder ist ein Einfluss auf bauteil- und prozesseitige Eigenschaften zu berücksichtigen. Ein Verhältnis im Bereich von 0,75 - wie in dieser Arbeit - ist aus folgenden Gründen ein vorteilhafter Kompromiss:

Bei zu geringen Verhältnissen ($< 0,75$), demnach scheibenförmigeren Zahnrädern, kann es zu einem Voreilen des Stoffflusses im Bauteilmittbereich während der Formgebung und einem „Ausbauchen“ der Zahnräder kommen. Hierdurch ist ein negativer Einfluss auf die nutzbare Höhe h_N möglich oder es könnte im Extremfall keine funktionsfähige Formfüllung der Verzahnungskavitäten erzielt werden. Für vergleichsweise geringe Verhältnisse ist die Auslegung von Verhältnissen im Bereich von 0,75 und die anschließende Trennung in zwei Zahnräder eine Alternative.

Für große Breiten-Durchmesser-Verhältnisse der Zahnräder ($> 0,75$) sind negative Auswirkungen auf die Bauteil- und Prozesseigenschaften möglich. Grundsätzlich bewirkt das Einleiten der Stempelkraft einen Setzvorgang des Rohlings, was einen radialen Materialfluss und damit ein Anlegen des Rohlings an der Matrizenwandung bedeutet (Bild 9). Aus Bauteilsicht sind ein Abstreifen des Schmierstoffs und/oder eine Verfestigung randnaher Bereiche möglich, wodurch ein negativer Effekt auf den Materialfluss in die Verzahnungskavitäten und somit auf die Bauteil-

genauigkeit folgt. Prozessseitig ist ein Anstieg der Reibung und in der Folge eine Erhöhung der erforderlichen Prozesskräfte möglich. Dies kann eine höhere Werkzeugauffederung und das Auftreten von frühzeitigem Werkzeugverschleiß bedeuten.

8.3 Bewertung der Erkenntnisse

Die erforschten Wirkzusammenhänge zwischen den Zahnradparametern – wie Zähnezahl, Modul und Schrägungswinkel – und den resultierenden Bauteil- sowie Prozesseigenschaften ermöglichen ein grundlegendes Prozessverständnis für das Kaltfließpressen von Zahnradern im „Samanta“-Verfahren. Insbesondere das Verständnis über den Einfluss der Bauteilgestalt auf das Prozessergebnis ist hilfreich für die Auswahl des Fertigungsverfahrens zur Herstellung von Zahnradern. Auch sind die Erkenntnisse relevant für die Auslegung der Bauteile, Werkzeuge und Prozesse.

Neben dem Prozessverständnis bilden die erarbeiteten Methoden zur vorteilhaften Beeinflussung des Prozessergebnisses einen wichtigen Grundstein, um das Einsatzpotential für das „Samanta“-Verfahren zu erhöhen. Von besonderer Bedeutung ist der untersuchte werkzeugseitige Ansatz. Durch die geometrische Anpassung der Umformzone der eingesetzten gerad- und schrägverzahnten Matrizen ist eine höhere Materialeffizienz und Verzahnungsgenauigkeit der Zahnradern erreichbar. Angesichts prozessseitiger Aspekte sind erforderliche Prozesskräfte und die auftretende Werkzeugbeanspruchung grundsätzlich reduzierbar.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Fokus der Arbeit stand das Kaltfließpressen von Zahnrädern im „Samanta“-Verfahren. Forschungsansätze bildeten die Erhöhung der Bauteilgenauigkeit und die Reduzierung der Werkzeugbeanspruchung. Hierfür wurde ein grundlegendes Prozessverständnis über den Einfluss von Zahnradparametern auf das Prozessergebnis erarbeitet. So wurde die Herstellbarkeit von unterschiedlichen Zahnradgeometrien und Verzahnungstypen für die Stahlsorten 16MnCr5 und C15C nachgewiesen. Aufbauend hierauf wurden praxisrelevante Methoden erforscht, um die Bauteil- und Prozesseigenschaften vorteilhaft beeinflussen zu können. Die Untersuchungen erfolgten anhand experimenteller und numerischer Analysen. Abschließend wurden die Ergebnisse zusammengefasst und im Sinne eines praktischen Nutzens bewertet, um Empfehlungen für die Zahnradherstellung im „Samanta“-Verfahren bereitzustellen.

Im Hinblick des Prozessverständnisses wurde der Einfluss der Zähnezahlsahl sowie des Moduln und Schrägungswinkels auf das Prozessergebnis analysiert. Mit steigender Zähnezahlsahl wird die Materialeffizienz etwas verringert. Eine Änderung der Zähnezahlsahl hat jedoch keine Auswirkungen auf die Profilabweichung. Für Geradverzahnungen wird die Flanken­genauigkeit durch die Zähnezahlsahl nicht beeinflusst, wobei bei schrägverzahn­ten Zahnrädern die Abweichung des Flankenwinkels mit zunehmender Zähnezahlsahl geringer ist. Das Verfestigungsniveau wird für steigende Zähnezahlsahlen reduziert. Prozessseitig werden für höhere Zähnezahlsahlen die Prozesskräfte erhöht, wohingegen die relative Prozesskraft abnimmt. Auf die Werkzeugbeanspruchung hat die Zähnezahlsahl aufgrund einer konstanten Kraft auf die Matrizen­zähne keine Auswirkungen.

Im betrachteten Parameterraum wird die Materialeffizienz infolge steigender Moduln und Schrägungswinkel reduziert. Die Ausformung eines Schrägungswinkels bewirkt eine asymmetrische Eigenschaftsverteilung, die mit zunehmenden Winkeln verstärkt wird. Zahnräder mit geringeren Moduln sind vergleichsweise präziser herstellbar. Auch sind im Vergleich von Gerad- und Schrägverzahnungen für geradverzahn­te Zahnräder niedrigere Toleranzklassen erreichbar. Hinsichtlich der Verfestigung treten für die untersuchten Moduln vergleichbare Härte­werte im Zahnfußbereich auf. Die integrale Verfestigung nimmt mit steigenden Moduln ab. Für die schrägverzahn­ten Zahnräder liegen im Zahnfußbereich und im Verzahnungsquerschnitt etwas höhere Härte­werte vor. Die Prozesskräfte werden mit steigendem Modul und Schrägungswinkel erhöht. Größere Zahnräder

sind jedoch vergleichsweise energieeffizienter herstellbar, da die relativen Prozesskräfte niedriger sind. Im Hinblick der Werkzeugbeanspruchung hat eine Modulerhöhung einen vorteilhaften Effekt auf das Beanspruchungsniveau. Die Herstellung von Schrägverzahnungen bedingt eine asymmetrische Spannungsverteilung und hat Auswirkungen auf die Beanspruchungssituation. Für steigende Flankenwinkel steigen die Spannungswerte im seitlichen Bereich des Matrizenzahns und überlagern im Extremfall die Spannungsmaxima im Schulterbereich.

Zur vorteilhaften Beeinflussung des Prozessergebnisses wurden eine Anpassung der Umformzonen der Matrizen und der Reibung während der Umformung untersucht. Durch eine Werkzeuganpassung wird neben der Materialeffizienz die Bauteilgenauigkeit erhöht. Besonders effektiv wird die Verzahnungsgenauigkeit bei Zahnrädern mit größeren Moduln verbessert und so vergleichbare Toleranzklassen mit denen für Zahnräder mit geringeren Moduln erzielt. Für Schrägverzahnungen ist zur Realisierung maximal möglicher Flankengenauigkeiten die Vorkorrektur der Matrizenzähne für das gewählte Prozesssetup individuell zu bestimmen. Prozessseitig werden maximale Prozesskräfte durch die angepassten Verzahnungsbereiche reduziert. Innerhalb einer Modulreihe wurde ein Skaleneffekt identifiziert, da für zunehmende Moduln die Reduzierung der Prozesskraft steigt. Die Werkzeugbeanspruchung wird für gerad- und für schrägverzahnte Matrizen bei Winkeln bis etwa 15° reduziert. Für größere Winkel werden die Spannungen im Seitenbereich und damit die Werkzeugbeanspruchung erhöht, was im Zuge der Werkzeugauslegung bei der Wahl der Größe der Einlaufradien zu berücksichtigen ist.

Die auftretende Reibung ist keine nutzbare Methode zur Beeinflussung des Stoffflusses, um die Materialeffizienz und Bauteilgenauigkeit zu verbessern. Jedoch werden durch eine hohe Reibung die Prozesskräfte und die Werkzeugbeanspruchung erhöht. Aus diesem Grund ist eine niedrige Reibung während der Umformung empfehlenswert.

Für zukünftige Forschungsaktivitäten ist der Parameterraum im Hinblick der Moduln zu erweitern, um die Übertragbarkeit der Zusammenhänge zu verifizieren. Ein weiterer Ansatz für die Herstellung von Schrägverzahnungen ist der Einsatz einer drehbar gelagerten Stempereinheit, da hierdurch eine Reduzierung der Prozesskräfte möglich ist, aber deren Einfluss auf die Bauteilgenauigkeit noch nicht bekannt ist. Von zentraler Bedeutung ist zudem der Transfer der erforschten Erkenntnisse dieser Arbeit in die Industrie, um zur Zahnradherstellung das Kaltfließpressen nach dem „Samanta“-Verfahren zukünftig einzusetzen.

10 Summary and outlook

The focus of this work was cold forging of gears by the "Samanta"-process. Research approaches included improving component accuracy and reducing tool load. For this purpose, a fundamental process comprehension of the influence of gear parameters on the process result was elaborated. As a result, the feasibility of manufacturing various gear geometries and gearing types for the steel grades 16MnCr5 and C15C was proven. On this basis, practical methods were researched in order to favourably influence the component and process properties. The investigations were conducted by means of experimental and numerical analyses. In conclusion, the results were summarized and evaluated in terms of practical benefits to provide recommendations for gear manufacturing using the "Samanta"-process.

Regarding the process understanding, the influence of the number of teeth as well as the module and helix angle on the process result was analyzed. As the number of teeth increases, the material efficiency is slightly reduced. However, a change in the number of teeth has no effect on the profile deviation. For spur gears, the flank accuracy is not influenced by the number of teeth, whereas for helical gears the deviation of the flank angle is smaller with increasing number of teeth. The hardening level is reduced for increasing numbers of teeth. On the process side, the process forces are higher for larger numbers of teeth, while the relative process force decreases. The number of teeth does not affect the tool load due to a constant force on the die teeth.

In the observed parameter range the material efficiency is reduced by increasing modules and helix angles. The shaping of a helix angle causes an asymmetrical property distribution, which is intensified with rising angles. Gears with lower moduli can be manufactured more precisely. In comparison to spur and helical gears, lower tolerance classes are achievable for spur gears. With regard to hardening, comparable hardness values occur in the tooth root area for the investigated modules. The integral hardening decreases with increasing moduli. For helical gears, slightly higher hardness values are obtained in the tooth root area and in the tooth cross section. The process forces are increased with increasing modulus and helix angle. Larger gears, however, are relatively more energy-efficient to produce since the relative process forces are lower. In terms of tool load, a module increase has an advantageous effect on the stress level. The production of helical gears causes an asymmetrical stress

distribution and affects the stress state. For rising flank angles, the stress values in the lateral area of the die tooth increase and in worst cases superimpose the stress maxima in the shoulder area.

For a beneficial influence of the process result, an adaptation of the forming zones of the dies and the friction during the forming process were investigated. A tool modification improves material efficiency and component accuracy. The gearing precision is improved particularly effectively for gears with larger modules and thus comparable tolerance classes are achieved with those for gears with smaller modules. For helical gears, the pre-correction of the die teeth needs to be individually determined for the selected process setup to realize maximum possible flank precision. On the process side, maximum process forces are reduced by the adapted gearing area. A scale effect was identified within the module series, as the reduction of the process force increases with rising modules. The tool load is reduced for straight and helical dies up to angles of about 15° . For larger angles, the stresses in the lateral area and thus the tool load are increased, which must be taken into account when selecting the size of the inlet radii in the course of tool design.

The occurring friction is not a usable method to control the material flow for improving material efficiency and component accuracy. However, high friction increases process forces and tool load. For this reason, low friction during forming is recommended.

For future research activities the parameter range should be extended regarding the modules to verify the transferability of the correlations. A further approach for the production of helical gears is the use of a rotatable mounted punching unit, as this may reduce the process forces but its influence on component accuracy is not yet known. The transfer of the obtained results of this work to the industry is of central importance to apply cold forging according to the "Samanta"-method for gear production in future.

Literaturverzeichnis

- [1] Kumar, Y.; Kumar, S.: Incremental Sheet Forming (ISF). In: *Advances in Material Forming and Joining*, New Delhi: Springer-Verlag, 2015, 29-46
- [2] Fujikawa, S.; Yoshioka, H.; Shimamura, S.: Cold- and warm-forming applications in the automotive industry. *Journal of Materials Processing Technology* 35(1992)3-4, 317-342
- [3] Doege, E.; Behrens, B.-A.: *Handbuch Umformtechnik: Grundlagen, Technologien, Maschinen*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2010, 2. Auflage
- [4] Ambrogio, G.; De Napoli, L.; Filice, L.; Gagliardi, F.; Muzzupappa, M.: Application of incremental forming process for high customised medical product manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology* 162(2005), 156-162
- [5] Jürgens, U.: Globalization and employment relations in the german auto industry. In: *Globalization and employment relations in the auto assembly industry: a study of seven countries*, Alphen aan den Rijn: Wolters Kluwer Law & Business, 2008
- [6] Tekkaya, A. E.; Khalifa, N. B.; Grzanic, G.; Hölker, R.: Forming of lightweight metal components: need for new technologies. *Procedia Engineering* 81(2014), 28-37
- [7] Pezzoli, K.: Sustainable development: a transdisciplinary overview of the literature. *Journal of Environmental Planning and management* 40(1997)5, 549-574
- [8] Jeswiet, J.; Geiger, M.; Engel, U.; Kleiner, M.; Schikorra, M.; Dufloy, J.; Bruschi, S.: Metal forming progress since 2000. *Annals of the CIRP* 1(2008)1, 2-17
- [9] Gunasekaran, A.; Korukonda, A. R.; Virtanen, I.; Yli-Olli, P.: Improving productivity and quality in manufacturing organizations. *International Journal of Production Economics* 36(1994)2, 169-183
- [10] Engel, U.; Groenbaek, J.; Hinsel, C.; Kroiß, T.; Meidert, M.; Neher, R.; Räuchle, F.; Schrader, T.: Tooling solutions for challenges in cold forging. *UTFScience* (2011)3, 1-24

- [11] Radzevich, S. P.: Dudley's handbook of practical gear design and manufacture. CRC Press, 2012
- [12] Damir, T. J.: Gears and gear drives. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2012
- [13] Bouzakis, K.-D.; Lili, E.; Michailidis, N.; Friderikos, O.: Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods. *Annals of the CIRP* 57(2008)2, 676-696
- [14] 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* 14(2013)6, 1007-1011
- [15] Doege, E.; Nägele, H.: FE simulation of the precision forging process of bevel gears. *Annals of the CIRP* 43(1994)1, 241-244
- [16] Lange, K.; Szentmihályi, V.: Optimized cold forging of helical gears by FEM-simulation. *Proceedings of the 9th International Cold Forging Congress (1995)*, 283-289
- [17] Samanta, S. K.: Helical Gear: A novel method of manufacturing. *IT Proceedings of NAMRC, Batelle Columbus Laboratories (USA) (1976)IV*, 199-255
- [18] Keppler-Ott, T.: Optimierung des Querfließpressens schrägverzahnter Stirnräder. *Dissertation, Universität Stuttgart*, 2002
- [19] Lange, K.; Kammerer, M.; Pöhlandt, K.; Schöck, J.: Fließpressen: Wirtschaftliche Fertigung metallischer Präzisionswerkstücke. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2008, 1. Auflage
- [20] Odening, D.; Meyer, M.; Klassen, A.; Bouguecha, A.; Behrens, B.-A.: Präzisionsschmieden. In: Bach, F.-W., Kerber, K.: *Prozesskette Präzisionsschmieden*, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2014, 15-51, 1. Auflage
- [21] Koll, W.; König, W.: Kaltfließpressen von Bauteilen mit Verzahnungen. In: *Präzisionsumformtechnik*, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1990, 193-213
- [22] Klocke, F.; Gorgels, C.; Kauffmann, P.; Herzhoff, S.; Schalster, R.; Stuckenberg, A.; Vasiliou, V.: Trends in der Zahnradfertigung. In: Neugebauer, R.: *Zerspanung in Grenzbereichen*, Zwickau: Verlag Wissenschaftliche Scripten, 2008, 87-113

- [23] Deneffle, R.: Getriebetechnik. In: Rieg, F., Kaczmarek, M.: Taschenbuch der Maschinenelemente, München: Carl Hanser-Verlag, 2006, 1. Auflage
- [24] Haberhauer, H.; Bodenstern, F.: Maschinenelemente: Gestaltung, Berechnung, Anwendung. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2014, 17. Auflage
- [25] Luo, S.; Wu, Y.; Wang, J.: The generation principle and mathematical models of a novel cosine gear drive. Mechanism and Machine Theory 43(2008)2, 1543-1556
- [26] Dubbel, H.: Zahnradgetriebe. In: Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer-Verlag, 2011, 23. Auflage
- [27] Linke, H.: Zahnräder und Zahnradgetriebe. In: Steinhilper, W., Sauer, B.: Konstruktionselemente des Maschinenbaus 2: Grundlagen von Maschinenelementen für Antriebsaufgaben, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2012, 369-569
- [28] Homburg, C.; Garbe, B.: Das Management industrieller Dienstleistungen: Problemfelder und Erfolgsfaktoren. Institut für Marktorientierte Unternehmensführung, Univ. Mannheim (1995)
- [29] Jütte, F.: Beitrag zum Präzisionsumformen von Stirnradverzahnungen. Dissertation, Universität Paderborn, 1986
- [30] Buchmayr, B.: Aktuelle Entwicklungstrends und zukünftige Herausforderungen im Bereich der Umformtechnik. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte 160(2015)10-11, 501-506
- [31] Denkena, B.; Tönshoff, H. K.: Spanen: Grundlagen. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2011, 3. Auflage
- [32] Bausch, T.: Innovative Zahnradfertigung: Verfahren, Maschinen und Werkzeuge zur kostengünstigen Herstellung von Stirnrädern mit hoher Qualität. Renningen: expert-Verlag, 2011, 4. Auflage
- [33] Schiemann, T.; Liewald, M.: Leichtbau durch Kaltmassivumformung - Erweiterung der Verfahrensgrenzen beim Bundanstauen von hohlen Fließpressteilen. Schmiede Journal (2013), 34-38
- [34] Dietrich, J.; Tschätsch, H.: Praxis der Umformtechnik. Wiesbaden: Vieweg Teubner, 2013, 11. Auflage
- [35] Herberich, R.; Labs, R.; Langejürgen, M.: Energiepotenziale in der Massivumformung. Schmiede-Journal 3(2010), 16-18

- [36] Herbertz, R.; Licht, W.; Fuss, F.: Materialeffizienz in der Massivumformung. Schmiede-Journal 9(2011), 20-25
- [37] Bartz, W. J.: Tribologie und Schmierung in der Umformtechnik; Typen, Eigenschaften, Anwendung und Grenzen der Schmierstoffe am Beispiel ausgewählter Umformprozesse. Renningen: expert-Verlag, 1987, 1. Auflage
- [38] Hänsel, M.; Geiger, R.: Leichtbau durch Einsatz endkonturnaher Kaltfließpressteile. Technische Mitteilungen Krupp 2(1995), 83-90
- [39] Lange, K.: Umformtechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Band 2: Massivumformung. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1988, 2. Auflage
- [40] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren, Band 4: Umformen. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2017, 6. Auflage
- [41] Kugler, H.: Umformtechnik: Umformen metallischer Konstruktionswerkstoffe. München: Carl Hanser-Verlag, 2009
- [42] 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 107(2000)1-3, 252-259
- [43] Jontschev, B.: Kaltumformen genauer Zahnräder. Wirtschaftlichkeit durch höhere Genauigkeit. Technische Rundschau 27(1991)83, 46-47
- [44] Hänsel, M.; Geiger, R.: Net-Shape-Umformung. Umformtechnik 29(1995)4, 218-224
- [45] Schröter, M.; Weißfloch, U.; Buschak, D.: Energieeffizienz in der Produktion: Wunsch oder Wirklichkeit. Mitteilung aus der ISI-Erhebung Modernisierung der Produktion 51(2009), 1-12
- [46] Dudenhöffer, F.; Pietron, K.; Stephan, A.: Die zweite Wachstumswelle der Autoindustrie. ifo Schnelldienst 65(2012)07, 28-31
- [47] Reinhart, G.; Geiger, F.; Karl, F.; Wiedemann, M.: Handlungsfelder zur Realisierung energieeffizienter Produktionsplanung undsteuerung. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 106(2011)9, 596-600

- [48] Adolf, W.: Potentiale massivumgeformter Bauteile. Schmiede-Journal 3(2005), 11-14
- [49] Çan, Y.; Altınbalık, T.; Akata, H. E.: A study of lateral extrusion of gear like elements and splines. Journal of Materials Processing Technology 166(2005)1, 128-134
- [50] VDI-Richtlinie: Kaltmassivumformen von Stählen; Anwendung, Arbeitsspiele, Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen für das Kaltfließpressen. Verein Deutscher Ingenieure (VDI), VDI 3138, Blatt 2, Beuth-Verlag, 1998
- [51] Fritz, A. H.; Schulze, G.: Fertigungstechnik. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1998, 9. Auflage
- [52] Silbernagel, C.: Beitrag zum Präzisionsschmieden von Zahnrädern für Pkw-Getriebe. Dissertation, Universität Hannover, 2003
- [53] Lennartz, J.: Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Getriebewellen. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1995
- [54] Schöck, J.; Kammerer, M.: Verzahnungsherstellung durch Kaltfließpressen. Umformtechnik 4(1999), 36-42
- [55] Ritthoff, M.; Liedtke, C.; Kaiser, C.: Technologien zur Ressourceneffizienzsteigerung: Hot Spots und Ansatzpunkte. Wuppertal: Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie, 2007
- [56] Leykamm, H.: Herstellung von verzahnungstragenden Werkstücken durch Kaltfließpressen. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 13(1982)9, 299-304
- [57] Vogler, F.; Karl, C.: Leichtbau-Kegelraddifferenzial ohne Korb. ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift 115(2013)6, 506-510
- [58] Vollrath, K.: Neue Leichtbaukonzepte durch Hohlschmieden. Konstruktion 1/2(2012), 2-3
- [59] Schmieder, F.; Kettner, P.: Fertigung von Getriebe-Hohlwellen durch Massivumformung. Informationsstelle Schmiedestück-Verwendung (1996)
- [60] Macherauch, E.; Syren, B.; Wolfahrt, H.: Der Bearbeitungseinfluss auf die Biegewechselfestigkeit. Allianz-Berichte (1976), 37-42
- [61] Sigwart, A.: Bauteilrandschicht und Schwingfestigkeit. Dissertation, Technische Universität Clausthal, 1993

- [62] Neugebauer, R.: Ressourceneffizienz: Schlüsseltechnologien für Wirtschaft & Gesellschaft. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2016, 1. Auflage
- [63] Vossen, K.: Pulverschmieden von gerad- und schrägverzahnten Zylinderrädern. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1987
- [64] Schmoekel, D.: Konturnah Fertigen in der Kaltmassivumformung Seminar, 13. Umformtechnisches Kolloquium, HFF-Hanover 6(1990), 6-10
- [65] Adolf, W.: Schmiedeteile: Gestaltung, Anwendung, Beispiele. Informationsstelle Schmiedestück-Verwendung, 1984
- [66] Koller, R.: Einflüsse auf die Schwingfestigkeit, In: (EMPA), E. M.-u. F.: Grundlagen der Betriebsfestigkeit. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), 1997
- [67] Bouchard, P. O.; Bourgeon, L.; Fayolle, S.; Mocellin, K.: An enhanced lemaître model formulation for materials processing damage computation. International Journal of Material Forming 4(2011)3, 299-315
- [68] Zucko, M.; Pöhlandt, K.; Pyzalla, A.; Reimers, W.; Kockelmann, H.: Berechnung der Umformeigenspannungen beim Fließpressen und Vergleich mit experimentellen Ergebnissen. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 28(2004)9, 417-423
- [69] Andreas, K.: Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim Kaltfließpressen. Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 2015
- [70] Schwager, A.; Kammerer, M.; Siegert, K.; Felde, A.; Körner, E.; Szentmihalyi, V.: Kaltumformen schräg innenverzahnter Hohlräder. Konferenzband Neuere Entwicklungen in der Massivumformung, Stuttgart (2003), 517-531
- [71] 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 41(2009)7-8, 684-693
- [72] Hirschvogel-Automotive-Group: Massivumgeformte Komponenten. Denklingen, 2014, 2. Auflage

- [73] Kleiner, M.; Geiger, M.; Klaus, A.: Manufacturing of lightweight components by metal forming. *Annals of the CIRP* 52(2003)2, 521-542
- [74] Breuer, H.: Gestaltung beanspruchungs- und fertigungsgerechter Schmiedeteile. *VDI Berichte* (1994)1137, 105-116
- [75] Exel, N.; Kaufmann, H.; Türk, M.: Einfluss des Faserverlaufs auf die Schwingfestigkeit von AFP-Stählen. *Schmiede-Journal* 3(2011), 32-34
- [76] Rupp, D.: Qualitätsvorteile der Schmiedestücke. *Konstruktion, Elemente, Methoden. Technologische Informationen für Konstruktion und Praxis* 18(1981)8, 25-28
- [77] 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* 37(2001)6-7, 549-558
- [78] Andreas, K.; Merklein, M.: Influence of surface integrity on the tribological performance of cold forging tools. *Procedia CIRP* 13(2014), 61-66
- [79] Baumgarten, J.: Ansätze zur Kompensation der elastischen Matrizenaufweitung bei Kaltmassivumformprozessen. *Dissertation, Universität Hannover*, 2003
- [80] Dreyer, G.: Untersuchungen zur Herstellung von komplexen Antriebsbauteilen durch Präzisionsschmieden. *Dissertation, Universität Hannover*, 2002
- [81] Rosochowski, A.; Balendra, R.: Secondary yielding of forged components due to unloading. *Journal of Materials Processing Technology* 115(2001)2, 223-239
- [82] Rosochowski, A.: Die compensation procedure to negate die deflection and component springback. *Journal of Materials Processing Technology* 115(2001)2, 187-191
- [83] Lu, X.; Balendra, R.: Finite element simulation for die-cavity compensation. *Journal of Materials Processing Technology* 115(2001)2, 227-232
- [84] Balendra, R.: Net-shape forming: state-of-the-art. *Journal of Materials Processing Technology* 115(2001)2, 172-179

- [85] Long, H.; Balendra, R.: Evaluation of elasticity and temperature effects on the dimensional accuracy of back-extruded components using finite element simulation. *Journal of Materials Processing Technology* 80(1998), 665-670
- [86] Long, H.; Balendra, R.: FE simulation of the influence of thermal and elastic effects on the accuracy of cold-extruded components. *Journal of Materials Processing Technology* 84(1998)1-3, 247-260
- [87] Lange, K.: Some aspects of the development of cold forging to a high-tech precision technology. *Journal of Materials Processing Technology* 35(1992)3-4, 245-257
- [88] Engel, U.: Beanspruchung und Beanspruchbarkeit von Werkzeugen der Massivumformung. Bamberg: Meisenbach-Verlag, 1996
- [89] Ou, H.; Balendra, R.: Die-elasticity for precision forging of aerofoil sections using finite element simulation. *Journal of Materials Processing Technology* 76(1998)1-3, 55-61
- [90] Qin, Y.; Balendra, K.: FE simulation of the influence of die-elasticity on component dimensions in forward extrusion. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 37(1997)2, 183-192
- [91] Lahoti, G. D.; Altan, T.: Prediction of metal flow and temperatures in axisymmetric deformation process. In: *Advances in Deformation Processing*, Boston: Springer-Verlag, 1978, 113-120
- [92] Laufer, M.: Untersuchungen über das Kaltfließpressen gerad- und schrägverzahnter Stirnräder. Dissertation, Universität Paderborn, 1991
- [93] Keppler-Ott, T.; Siegert, K.: Compensation of the press frame expansion for cold extrusion dies. 10 th International Cold Forging Congress (2000), 119-135
- [94] Schmieder, F.: Beitrag zur Fertigung von schrägverzahnten Stirnrädern durch Querfließpressen. Universität Stuttgart, 1993
- [95] Sweeney, K.: Kaltfließpressen von Schrägverzahnungen. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2000
- [96] Szentmihályi, V.: Beitrag der Prozeßsimulation zur Entwicklung komplexer Kaltumformteile. Dissertation, Universität Stuttgart, 1994

- [97] Balendra, R.: Influence of forming press elasticity on the accuracy of formed components. Proceedings 5th ICTP (1996), 291-294
- [98] Behrens, B.-A.; Bouguecha, A.; Lüken, I.; Klassen, A.; Odening, D.: Near-Net and Net Shape Forging. Comprehensive Materials Processing 3(2014), 427-446
- [99] Muthmann, F.; Schäfer, R.: Hohe Genauigkeit bei hohen Geschwindigkeiten. Maschinen Markt (2016), 46-48
- [100] Noack, P.: Rechnergestützte Arbeitsplanerstellung und Kostenberechnung beim Kaltmassivumformen von Stahl. Universität Stuttgart, 1979
- [101] ICFG-Document: Tool Life & Tool Quality in Cold Forging, Part Two: Quality requirements for tool manufacturing. International Cold Forging Group (ICFG), Doc. 16/04, Bamberg: Meisenbach-Verlag, 2004
- [102] Cser, L.: A generalized life-time model for cold extrusion tools. Annals of the CIRP 40(1991)1, 299-301
- [103] ICFG-Document: Tool Life & Tool Quality in Cold Forging, Part One: General aspects of tool life. International Cold Forging Group (ICFG), Doc. 14/02, Bamberg: Meisenbach-Verlag, 2002
- [104] Cosenza, C.; Fratini, L.; Pasta, A.; Micari, F.: Damage and fracture study of cold extrusion dies. Engineering Fracture Mechanics 71(2004)7-8, 1021-1033
- [105] Brøndsted, P.; Skov-Hansen, P.: Fatigue properties of high-strength materials used in cold forging tools. International Journal of Fatigue 20(1998)5, 373-381
- [106] Hänsel, M.: Beitrag zur Simulation der Oberflächenermüdung von Umformwerkzeugen. Dissertation, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, 2013
- [107] Schätzle, W.: Querfließpressen eines Flansches oder Bundes an zylindrischen Vollkörpern aus Stahl. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1987, 1. Auflage
- [108] Völkl, R.; Engel, U.; Reiss, A.; Neher, R.; Werner, N.: Beanspruchungsangepasste Bauteileigenschaften durch effiziente, optimierte Kaltumformprozesse

- [109] Lange, K.; Szentmihályi, V.: FE-Prozeßsimulation als Beitrag zur Optimierung von Werkzeugen zum Kalt-Querfließpressen schrägverzahnter Stirnräder. Konferenzband Neuere Entwicklungen in der Massivumformung (1993), 343-363
- [110] Kondo, K.; Ohga, K.: Precision cold die forging of a ring gear by divided flow method. International Journal of Machine Tools and Manufacture 35(1995)8, 1105-1113
- [111] Norm DIN 8583-6:2003-09: Fertigungsverfahren Druckumformen - Teil 6: Durchdrücken; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth-Verlag, 2003
- [112] Jütte, F.: Fließpressen: Schrägverzahnungen lassen sich auch umformtechnisch präzise herstellen. MaschinenMarkt (2008)33, 24-27
- [113] Choi, J.; Cho, H.; Kwon, H.: A new extrusion process for helical-gears: experimental study. Journal of Materials Processing Technology 44(1994)1, 35-53
- [114] König, W.; Steffens, K.; Hoffmann, H.: Gear production by cold forming. Annals of the CIRP 34(1985)1, 481-483
- [115] Yun, J. H.; Jeong, M. S.; Lee, S. K.; Jeon, J. W.; Park, J. Y.; Kim, G. M.: Sustainable production of helical pinion gears: environmental effects and product quality. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology 1(2014)1, 37-41
- [116] Klocke, F.; Raedt, H. W.: Entwicklung von Hartstoffschichten für die umweltfreundliche Kaltumformung mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik 31(2000)8, 801-804
- [117] Knoerr, M.; Lange, K.; Altan, T.: Fatigue failure of cold forging tooling: causes and possible solutions through fatigue analysis. Journal of Materials Processing Technology 46(1994)1, 57-71
- [118] ICFG-Document: General recommendations for design, manufacture and operational aspects of cold extrusion tools for steel components. International Cold Forging Group (ICFG), Doc. 6/82, Bamberg: Meisenbach-Verlag, 1987

- [119] Hinsel, C.; Maegaard, V.: Voraussetzungen für den erfolgreichen Einsatz von Technologien zur Erhöhung der Werkzeuglebensdauer - Wirtschaftliche und technologische Aspekte am Beispiel von Armierungssystemen. In: Groche, P.: Tagungsband zum 17. Jahrestreffen der Kaltmassivumformer, VDI, 2002, 6-7
- [120] VDI-Richtlinie: Vorgespannte Presswerkzeuge für das Kaltmassivumformen. Verein Deutscher Ingenieure (VDI), VDI 3176, Berlin: Beuth-Verlag, 1986
- [121] Grønbaek, J.: Stripwound cold-forging tools - a technical and economical alternative. *Journal of Materials Processing Technology* 35(1992)3-4, 483-493
- [122] Groenbaek, J.; Birker, T.: Innovations in cold forging die design. *Journal of Materials Processing Technology* 98(2000)2, 155-161
- [123] Jütte, F.: Aktive Matrize zur Prozessregelung in der Umformtechnik. *Umformtechnik* 3(1993), 207-210
- [124] Geiger, M.; Hänsel, M.; Rebhan, T.: Improving the fatigue resistance of cold forging tools by FE simulation and computer aided die shape optimization. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 206(1992)2, 143-150
- [125] Thomsen, S. G.: Optimization of dies for axisymmetric cold forward extrusion. *Engineering optimization* 11(1987)1-2, 13-20
- [126] König, W.; Koll, W.: Cold extrusion of helical involute cylindrical gears. *European Journal of Mechanical Engineering* 35(1990)4, 179-183
- [127] Hoffmann, H.; Spur, G.; Neugebauer, R.: *Handbuch Umformen*. München: Carl Hanser-Verlag, 2012, 2. Auflage
- [128] Lange, K.; Cser, L.; Geiger, M.; Kals, J. A. G.: Tool life and tool quality in bulk metal forming. *Annals of the CIRP* 41(1992)2, 667-675
- [129] Dohmann, F. *Präzisionsumformtechnik: Technologische Grenzen von Kaltfließpreßverfahren zur Herstellung gerad- und schrägverzahnter Werkstücke*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 1990

- [130] Klocke, F.; König, W.: *Fertigungsverfahren, Band 3: Abtragen, Generieren und Lasermaterialbearbeitung*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2007, 4. Auflage
- [131] Awiszus, B.; Bast, J.; Dürr, H.; Matthes, K.-J.: *Grundlagen der Fertigungstechnik*. Leipzig: Carl Hanser-Verlag, 2012, 5. Auflage
- [132] Ekmekci, B.: Residual stresses and white layer in electric discharge machining (EDM). *Applied Surface Science* 253(2007)23, 9234-9240
- [133] Pöhlandt, K.; Mucha, A.; Ruf, A.; Schmid, H.; Bartz, W. J.: *Werkzeuge der Kaltmassivumformung: Grundlagen und Praxis*. Renningen: expert-Verlag, 1999, 1. Auflage
- [134] Cusanelli, G.; Hessler-Wyser, A.; Bobard, F.; Demellayer, R.; Perez, R.; Flükiger, R.: Microstructure at submicron scale of the white layer produced by EDM technique. *Journal of Materials Processing Technology* 149(2004)1, 289-295
- [135] Rebelo, J. C.; Morao Dias, A.; Kremer, D.; Lebrun, J. L.: Influence of EDM pulse energy on the surface integrity of martensitic steels. *Journal of Materials Processing Technology* 84(1998)1, 90-96
- [136] Raju, H. P.; Narayanasamy, K.; Srinivasa, Y. G.; Krishnamurthy, R.: Characteristics of extrude honed SG iron internal primitives. *Journal of Materials Processing Technology* 166(2005)3, 455-464
- [137] ICFG-Document: Tool Life & Tool Quality in Cold Forging, Part Five: Surface finishing of cold forging tools. International Cold Forging Group. International Cold Forging Group (ICFG), Doc. 23/13, Bamberg: Meisenbach-Verlag, 2013
- [138] Ebara, R.: Fatigue crack initiation and propagation behavior of forging die steels. *International Journal of Fatigue* 32(2010)5, 830-840
- [139] Harada, Y.; Fukauara, K.; Kohamada, S.: Effects of microshot peening on surface characteristics of high-speed tool steel. *Journal of Materials Processing Technology* 201(2008)1, 319-324
- [140] Kirk, D.: Review of shot peened surface properties. *The Shot Peener* 21(2007)4, 24-30

- [141] Matsumoto, R.; Kai, N.; Tomita, Y.; Kajioka, A.; Mori, S.; Utsunomiya, H.: Characterization of surface profile of shot peened cemented tungsten carbide dies with micro valleys and their lubrication performance in cold forging. *Procedia Engineering* 207(2017), 1135-1140
- [142] Abe, Y.; Mori, K.; Hatashita, F.; Shiba, T.; Daodon, W.; Osakada, K.: Improvement of seizure resistance in ironing of stainless steel cup with cermet die having fine lubricant pockets. *Journal of Materials Processing Technology* 234(2016), 195-207
- [143] VDI-Richtlinie: Qualitätssicherung bei der PVD- und CVD-Hartstoffbeschichtung, Eigenschaftsprofile und Anwendungsgebiete von Hartstoffbeschichtungen. Verein Deutscher Ingenieure (VDI), VDI 3824, Berlin: Beuth-Verlag, 2002
- [144] Teller, M.; Bambach, M.; Hirt, G.; Roß, I.; Temmler, A.; Poprawe, R.; Schneider, J. M.: Methodik zur Entwicklung von interaktionsminimierten Oberflächenschichten für das schmiermittelfreie Kaltfließpressen von Aluminium. *Dry Metal Forming Open Acces Journal* 1(2015), 34-41
- [145] ICFG-Document: Coating of tools for bulk metal forming by PVD- and CVD-methods. International Cold Forging Group (ICFG), Doc. 9/92, Bamberg: Meisenbach-Verlag, 1993
- [146] VDI-Richtlinie: Beschichten von Werkzeugen der Kaltmassivumformung, CVD- und PVD-Verfahren. Verein Deutscher Ingenieure (VDI), VDI 3198, Düsseldorf: Beuth-Verlag, 1992
- [147] König, W.; Koll, W.: Kaltfließpressen ohne Schmierstoff Dünne Schichten - große Leistung. *Umformtechnik* 27(1993), 319-325
- [148] Podgornik, B.; Sedlaček, M.; Čekada, M.; Jacobson, S.; Zajec, B.: Impact of fracture toughness on surface properties of PVD coated cold work tool steel. *Surface and Coatings Technology* 277(2015), 144-150
- [149] ICFG-Document: General Aspects of Tool Design and Tool Materials for Cold and Warm Forging International Cold Forging Group (ICFG), Doc. 4/82, Bamberg: Meisenbach-Verlag, 1992
- [150] Czichos, H.; Habig, K.-H.: *Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2015, 4. Auflage

- [151] Kiener, C.; Neher, R.; Merklein, M.: Influence of tribological conditions on cold forging of gears. *Production Engineering* 12(2018)3-4, 1-9
- [152] Bartz, W. J.: *Handbuch der Tribologie und Schmierungstechnik: Tribologie und Schmierung bei der Massivumformung*. Renningen: expert-Verlag, 2004
- [153] Vogel, J.; Bergmann, E.: Problems encountered with the introduction of ion plating to large-scale coating of tools. *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films* 4(1986)6, 2731-2739
- [154] Zang, S.: *Bestimmung von Temperaturen und deren Einflüsse auf tribologische Systeme der Kaltmassivumformung*. Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2017
- [155] Mattfeld, P.-M.: *Tribologie der zinkphosphatfreien Kaltmassivumformung*. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2014
- [156] ICFG-Document: *Lubrication aspects in cold forging of carbon steels and low alloy steels*. International Cold Forging Group (ICFG), Doc. 8/91, Bamberg: Meisenbach-Verlag, 1991
- [157] Lange, K.: *Umformtechnik: Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Band 1: Grundlagen*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2002, 2. Auflage
- [158] Sankara Narayanan, T. S. N.: Surface pretreatment by phosphate conversion coatings-A review. *Reviews in Advanced Materials Science* 9(2005), 130-177
- [159] Bay, N.: The state of the art in cold forging lubrication. *Journal of Materials Processing Technology* 46(1994)1-2, 19-40
- [160] VDI-Richtlinie: *Kaltmassivumformung von Stählen und NE-Metallen - Grundlagen für das Kaltfließpressen*. Verein Deutscher Ingenieure (VDI), VDI 3138, Blatt 1, Berlin: Beuth-Verlag, 1998
- [161] Völkl, R. M.: *Stochastische Simulation zur Werkzeughaltbarkeitsoptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung*. Dissertation, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, 2007

- [162] Roos, E.; Maile, K.: Werkstoffkunde für Ingenieure: Grundlagen, Anwendung, Prüfung. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2011, 4. Auflage
- [163] Bay, N.; Eriksen, M.; Tan, X.; Wibom, O.: A friction model for cold forging of aluminum, steel and stainless steel provided with conversion coating and solid film lubricant. *Annals of the CIRP* 60(2011)1, 303-306
- [164] Ognjanovic, M.: Decisions in gear train transmission design. *Research in Engineering Design* 8(1996)3, 178-187
- [165] Norm DIN EN 10084:2008-06: Einsatzstähle - Technische Lieferbedingungen. Berlin: Beuth-Verlag, 2008
- [166] Norm DIN EN 10263:2002-02: Walzdraht, Stäbe und Draht aus Kaltstauch- und Kaltfließpresstählen - Teil 2: Technische Lieferbedingungen für nicht für eine Wärmebehandlung nach der Kaltverarbeitung vorgesehene Stähle. Berlin: Beuth-Verlag, 2002
- [167] Norm DIN 50106:2016-11: Prüfung metallischer Werkstoffe - Druckversuch bei Raumtemperatur. Berlin: Beuth-Verlag, 2016
- [168] Hockett, J.; Sherby, O.: Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperatures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 23(1975)2, 87-98
- [169] Berns, H.; Melander, A.; Weichert, D.; Asnafi, N.; Broeckmann, C.; Groß-Weege, A.: A new material for cold forging tools. *Computational Materials Science* 11(1998)3, 166-180
- [170] Gronostajski, Z.; Hawryluk, M.: The main aspects of precision forging. *Archives of civil and mechanical engineering* 8(2008)2, 39-55
- [171] Datenblatt Powder metallurgy HSS ASP 2012 Firma Zapp-Materials-Engineering. 2008
- [172] Datenblatt 1.2343: X38CrMoV5-1 Firma Stauberstahl. 2019
- [173] Norm DIN EN ISO 75000-1:2018-06: Metallische Werkstoffe - Kalibrierung und Überprüfung von statischen einachsigen Prüfmaschinen - Teil 1: Zug- und Druckprüfmaschinen - Kalibrierung und Überprüfung der Kraftmesseinrichtung. Berlin: Beuth-Verlag, 2018

- [174] Niederkorn, S.: Messeinrichtungen zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen. Dissertation, Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg, 1998
- [175] Kiener, C.; Dohmstreich, J.; Andreas, K.; Merklein, M.: Influence of tribological conditions on cold forging processes. Proceedings THE"A" Coatings (2017), 129-138
- [176] 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 189(2007)1, 36-44
- [177] 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 33(1992)1-2, 95-108
- [178] Geiger, R.: Der Stofffluss beim kombinierten Napffließpressen Dissertation, Universität Stuttgart, 1976
- [179] Tekkaya, A. E.: A guide for validation of FE-simulations in bulk metal forming. Arabian Journal for Science and Engineering 30(2005)1, 113-136
- [180] Norm DIN 3962-1:1978-08: Toleranzen für Stirnradverzahnungen; Toleranzen für Abweichungen einzelner Bestimmungsgrößen. Berlin: Beuth-Verlag, 1978
- [181] Norm ISO 1328-1:2013-09: Cylindrical gears - ISO Systems of accuracy - Part 1: Definitions and allowable values of deviations relevant to corresponding flanks of gear teeth Berlin: Beuth-Verlag, 2013
- [182] Norm DIN EN ISO 14577-1:2015-11: Metallische Werkstoffe - Instrumentierte Eindringprüfung zur Bestimmung der Härte und anderer Werkstoffparameter - Teil 1: Prüfverfahren. Berlin: Beuth-Verlag, 2015
- [183] Norm DIN EN ISO 6507-1:2006-03: Metallische Werkstoffe - Härteprüfung nach Vickers - Teil 1: Prüfverfahren Berlin: Beuth-Verlag, 2006
- [184] Felten, K.: Verzahntechnik: das aktuelle Grundwissen über Herstellung und Prüfung von Zahnrädern. Rennigen: expert-Verlag, 2008

- [185] Wei, F.; Lin, H.; Xing-hui, H.: Finite element analysis and simulation for cold precision forging of a helical gear. *Journal of Central South University Press* 19(2012)12, 3369-3377
- [186] ICFG-Document: Calculation methods for cold forging tools. International Cold Forging Group (ICFG), Doc. 5/82, Bamberg: Meisenbach-Verlag, 1982
- [187] Klocke, F.; Nöthe, T.: Fine machining of cold forging tools. 10th International Cold Forging Congress (2000), 175-191
- [188] Kiener, C.; Merklein, M.: Researching of commonalities and differences in cold forging of spur and helical gears. *Production Engineering* 13(2019)3-4, 391-397
- [189] Kiener, C.; Andreas, K.; Merklein, M.: Basic numerical analysis of a "samanta" based forward extrusion process. *Advanced Materials Research* 1140(2016), 27-34
- [190] Feng, W.; Lv, J.; Hua, L.; Long, H.; Wang, F.: Effect of relief-hole diameter on die elastic deformation during cold precision forging of helical gears. *Procedia Engineering* 207 (2017), 627-632
- [191] 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* 130-131(2002), 532-539
- [192] Klassen, A.; Biströn, B.; Dellinger, P.; Schaup, J.; Deißer, T. A.; Behrens, L.; Köhler, J.; Bouguecha, A.; Möhwald, K.; Denkena, B.; Behren, B.-A.: *Werkzeugtechnologie*. In: Bach, F.-W., Kerber, K.: *Prozesskette Präzisionsschmieden*, Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2014, 1. Auflage
- [193] Walters, J.; Kurtz, S.; Wu, W.-T.; Tang, J.: The 'state of the art' in cold forming simulation. *Journal of Materials Processing Technology* 71(1997)1, 64-70
- [194] Vollrath, K.: *Simulation for forging process*. Hagen: Infostelle Industrieverband Massivumformung (2013)
- [195] Kiener, C.; Merklein, M.: Virtuelle Analysetools - Eine smarte Methode zur effizienten Erforschung von Kaltfließprozessen. *Zeitschrift Konstruktion* 12(2017)3-4, 78-82
- [196] Kim, H.; Yagi, T.; Yamanaka, M.: FE simulation as a must tool in cold/warm forging process and tool design. *Journal of Materials Processing Technology* 98(2000)2, 143-149

- [197] Jun, B. Y.; Kang, S. M.; Lee, M. C.; Park, R. H.; Joun, M. S.: Prediction of geometric dimensions for cold forgings using the finite element method. *Journal of Materials Processing Technology* 189(2007)1-3, 459-465
- [198] Octrue, M.; Ghribi, D.; Sainsot, P.: A contribution to study the tooth flank fracture (TFF) in cylindrical gears. *Procedia Engineering* 213 213(2018), 215-226
- [199] Song, J.-H.; Im, Y.-T.: Determination of a major design parameter for forward extrusion of spur gears. *Journal of manufacturing science and engineering* 126(2004)2, 255-263
- [200] Kanetake, N.; Lange, K.: Effect on friction, strain hardening, and strain rate hardening on the metal flow in rod extrusion. *Steel Research* 58(1987)10, 460-464
- [201] Engel, U.; Egerer, E.: Basic research on cold and warm forging of microparts. *Key Engineering Materials* 233(2003), 449-456

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Kiener, C.; Andreas, K.; Merklein, M.: Basic Numerical Analysis of a “Samanta” Based Forward Extrusion Process. *Advanced Materials Research* 1140(2016), 27-34
- [P2] Kiener, C.; Dohmstreich, J.; Andreas, K.; Merklein, M.: Influence of tribological conditions on cold forging processes. *Proceedings THE”A” Coatings* (2017), 129-138
- [P3] Kiener, C.; Merklein, M.: Virtuelle Analysetools – Eine smarte Methode zur effizienten Erforschung von Kaltfließpressprozessen. *Zeitschrift Konstruktion* 12(2017)3-4, 78-82
- [P4] Kiener, C.; Neher, R.; Merklein, M.: Influence of tribological conditions on cold forging of gears. *Production Engineering* 12(2018)3-4, 367-375
- [P5] Kiener, C.; Merklein, M.: Researching of commonalities and differences in cold forging of spur and helical gears. *Production Engineering* 13(2019)3-4, 391-397
- [P6] Kiener, C.; Merklein, M.: Research of Adapted Tool Design in Cold Forging of Gears. *International Journal of Material Forming* (2019), DOI: <https://doi.org/10.1007/s12289-019-01508-0>, akzeptiert

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten*

- [S1] Liegl, S.; Kiener, C.; Merklein, M.: Numerische Analyse eines Kaltmassivumformprozesses zur Herstellung von Zahnrädern. Erlangen, 2016
- [S2] Konrad, F.; Kiener, C.; Merklein, M.: Numerische Analyse zur fließpresstechnischen Herstellung schrägverzahnter Zahnräder. Erlangen, 2016
- [S3] Jobst, A.; Kiener, C.; Merklein, M.: Ermittlung von Bauteil- und Prozesseigenschaften beim Kaltfließpressen von Zahnrädern im „Samanta“-Verfahren. Erlangen, 2017
- [S4] Proff, S.; Kiener, C.; Merklein, M.: Prozessmodellierung und -analyse des Kaltfließpressens von Zahnrädern im „Samanta“-Verfahren. Erlangen, 2017
- [S5] Rohrmoser, A.; Kiener, C.; Merklein, M.: Numerische Analyse des Kaltfließpressens von Zahnrädern im „Samanta“-Verfahren. Erlangen, 2017
- [S6] Proff, S.; Kiener, C.; Merklein, M.: Anwendung des „Samanta“-Verfahrens für das Kaltfließpressen gerad- und schrägverzahnter Zahnräder. Erlangen, 2018
- [S7] Rohrmoser, A.; Kiener, C.; Merklein, M.: Kaltfließpressen geradverzahnter Zahnräder für einen Einsatz in der Antriebs- und Getriebetechnik. Erlangen, 2018
- [S8] Tortosa Diez de Ulzurrun, C.; Kiener, C.; Merklein, M.: Kaltfließpressen gerad- und schrägverzahnter Zahnräder im „Samanta“-Verfahren. Erlangen, 2018
- [S9] Liegl, S.; Kiener, C.; Merklein, M.: Anwendung des „Samanta“-Verfahrens für das Kaltfließpressen gerad- und schrägverzahnter Zahnräder. Erlangen, 2018

* Der Autor an zweiter (und ggf. dritter) Stelle bezeichnet den bzw. die Betreuer der studentischen Arbeit und an letztgenannter Stelle den/die Lehrstuhlinhaber/in.

- [S10] Reuter, T.; Kiener, C.; Merklein, M.: Einfluss der tribologischen Bedingungen beim Kaltfließpressen von Bauteilen. Erlangen, 2018
- [S11] Layer, M.; Kiener, C.; Merklein, M.: Kaltfließpressen gerad- und schrägverzahnter Zahnräder im „Samanta“-Verfahren. Erlangen, 2018
- [S12] Hafner, P.; Kiener, C.; Merklein, M.: Umformtechnische Herstellung gerad- und schrägverzahnter Zahnräder. Erlangen, 2018
- [S13] Peters, K.; Kiener, C.; Merklein, M.: Erforschung des Kaltfließpressens von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern. Erlangen, 2018
- [S14] Liegl, S.; Kiener, C.; Merklein, M.: Erforschung von Umformprozessen zur Herstellung anspruchsvoller Bauteilgeometrien. Erlangen, 2018
- [S15] Rehm, T.; Kiener, C.; Merklein, M.: Erforschung des Kaltfließpressens von Zahnrädern im „Samanta“-Verfahren. Erlangen, 2019
- [S16] Reck, M.; Kiener, C.; Merklein, M.: Kaltfließpressen von schrägverzahnten Zahnrädern im „Samanta“-Verfahren. Erlangen, 2019
- [S17] Hafner, P.; Kiener, C.; Merklein, M.: Umformtechnische Herstellung von Zahnrädern im „Samanta“-Verfahren: Zahnradparameter und deren Einfluss auf die Bauteil- und Prozesseigenschaften. Erlangen, 2019
- [S18] Schmitt, F.; Kiener, C.; Merklein, M.: Erforschung der umformtechnischen Herstellung von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern. Erlangen, 2019
- [S19] Scheuer, D.; Kiener, C.; Merklein, M.: Umformtechnische Herstellung gerad- und schrägverzahnter Zahnräder im „Samanta“-Verfahren. Erlangen, 2019

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2020):
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

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

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

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

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
KTmfk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien

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 Bearbeitungsquali-
tät im Fertigungssystem Laserstrahl-
schneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz
Modell zur datenbankgestützten Planung
automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhal-
tens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von
Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte
Montageplanung am Beispiel der
Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

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

Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montage-
feinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines
übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab.
1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und
Prozeßdiagnostik für das Schneiden
mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab.
1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexiblen
Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten
Diagnosesystems für automatisierte
Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte
Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von
Softwaresystemen für rechnergeführte
Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumforme mit
elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab.
1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer
Multiprozessorsteuerung für
kooperierende Industrieroboter in
Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer
Entwicklung problemspezifischer
Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr
Beitrag zur optimalen
Verbindungstechnik in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief
Untersuchungen zur Verfahrensfolge
Laserstrahlschneiden und -schweißen
in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab.
1991. ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim
Rechnerunterstützte Optimierung
von Materialflußstrukturen in der
Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller
CO₂-Laserstrahlschneiden von
kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung
bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann
Entwicklung einer
CAD/CAM-Prozesskette für die
Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann
Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen: Prozeßführung und
Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbear-
beitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit
objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch
Planungs- und Steuerungswerkzeuge
zur impliziten Geräteprogrammierung
in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommuni-
kationsverhaltens von Automatisierungs-
geräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless
Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel
Entwicklung und Einsatz eines Simula-
tionsverfahrens für operative und
strategische Probleme der
Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann
Operatives Fertigungscontrolling durch
Optimierung auftragsbezogener Bearbei-
tungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra
Entwicklung eines benutzerorientierten
Werkstattprogrammiersystems für das
Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels
Modellierung und Optimierung von
Montageanlagen in einem integrierten
Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmen-
der Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz
Oberflächenfeinbearbeitung
keramischer Werkstoffe mit
XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994.
ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp
Rechnerunterstützung bei Test und
Schulung an Steuerungssoftware von
SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch
Wissensbasierte Unterstützung der
Angebotsbearbeitung in der
Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp
Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim
Schneiden mit einem gepulsten
Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18241-1.

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

Band 44: Armin Rothhaupt
Modulares Planungssystem zur
Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der
Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann
Beitrag zur automatisierten
Handhabungsplanung komplexer
Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher
Konzept zur rechnerintegrierten
Materialversorgung in flexiblen
Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und
Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke
Integrierte Entwicklung neuer
Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle
Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie
Zeitbehandlung und
Multimedia-Unterstützung in
Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996.
ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und
Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-070-2.

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und
der Fokusparameter einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement
in der integrierten Produkt- und
Prozeßplanung
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept
für den flexiblen Materialfluß in der
Elektronikproduktion
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim
Laserstrahlschweißen
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung
an offenen CNC-Steuerungen zur
Prozeß- und Programoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und
Prozeßplanung zur Leistungs- und
Qualitätssteigerung beim
Spulenwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung
für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für
CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler
Schraubstationen in der
automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen
in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke
Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller
Automatisierte Demontagesysteme
und recyclinggerechte Produktgestaltung
elektronischer Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meißner
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 mechani-
scher Eigenschaften von Feinblechen mit
dem Wirbelstromverfahren
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard
Qualitätssteigerung in der
Elektronikproduktion durch
Optimierung der Prozeßführung
beim Löten komplexer Baugruppen
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh
Methodische Einbindung der Simulation
in die betrieblichen Planungs- und
Entscheidungsabläufe
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn
Meßeinrichtung zur Untersuchung
der Wirkflächenreibung bei umformtech-
nischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert
Regelung der Fokuslage beim Schweißen
mit CO₂-Hochleistungslasern unter
Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo
Development and Implementation of
Hierarchical Control Structures of
Flexible Production Systems Using High
Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt
Effizienzsteigerung bei Demontage
und Recycling durch flexible
Demontagetechologien und optimierte
Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz
Modelle und effiziente Modellbildung
zur Qualitätssicherung in der
Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID) FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker
Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger
Herstellungs- und Prüfverfahren für
thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach
Beitrag zur rechnerunterstützten
verursachungsgerechten
Angebotskalkulation von Blechteilen
mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach
Bildverarbeitungssystem zur Erfassung
der Anschlußgeometrie elektronischer
SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk
Simulationsbasierte
Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge
der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-136-9.

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

Band 102: Christian Hinsel
Ermüdungsbruchversagen
hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle
in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert
Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen
von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungswerkzeug zum
Produktionsmanagement in der
Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.
Band 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 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen
durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-
Punktschweißen in der Elektronikpro-
duktion
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 Anschlußkontak-
ten 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 Ein-
satz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-182-2.

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

Band 130: Thomas Pohl
Fertigungsqualität und Umformbarkeit
laserstrahlgeschweißter Formplatinen
aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk
Entwicklung eines konfigurierbaren
Steuerungssystems für die flexible
Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck
Neue Sensorik und Aktorik für
Bearbeitungsköpfe zum
Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis
Integrierte Fertigung - Verfahrensin-
tegration durch Innenhochdruck-Umfor-
men, 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 produktbezoge-
ner 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 Magnesiumlegie-
rungen 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 Produkt-
strukturen 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 Diodenlaserstrah-
lung von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker
Tribologische Eigenschaften keramischer
Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer
Oberflächenendbearbeitung mittels
Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger
Prozessoptimierung in der Wickeltechnik
durch innovative maschinenbauliche und
regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama
Effizienzsteigerung in der Montage durch
marktorientierte Montagestrukturen und
erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm
Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Ent-
wicklung von Konzepten und Methoden
für die rechnerunterstützte Modellierung
und Optimierung von komplexen
Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-206-3.

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

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

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

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinst-
teile 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 trockenschmier-
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im
Presswerk Grundlegende Untersuchun-
gen zur Tribologie, zum Umformverhal-
ten 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 - Prozessana-
lyse 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 Leichtbauverbundstruk-
turen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimie-
rung 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 Prechtl
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 Laserdurchstrahlenschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods
LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker
Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten
FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer
Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht
Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge
LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß
Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch
Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber
Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick
Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht
Werkstoffcharakterisierung und
Prozessauslegung für die wirkmedienba-
sierte Doppelblech-Umformung von
Magnesiumlegierungen
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl
Stochastische Simulation zur Werkzeug-
lebensdaueroptimierung und Präzisions-
fertigung in der Kaltmassivumformung
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi
Innenhochdruck-Umformen verstärkter
Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen
beim Presshärten des höchstfesten
Vergütungsstahls 22MnB5
LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez
Simulationsgestützte Methoden zur
effizienten Gestaltung von Lötprozessen
in der Elektronikproduktion
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze
Automatisierte Montage von makrome-
chatronischen Modulen zur flexiblen
Integration in hybride
Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter
Grundlegende Untersuchungen zur
experimentellen Ermittlung und zur
Modellierung von Fließortkurven bei
erhöhten Temperaturen
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellungs-
verfahren und erweiterte Qualitätssiche-
rung von einsetzgerechten elektroni-
schen 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 Rührreibschweißen metallischer
Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung
des Werkstoffverhaltens von
presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl
Untersuchungen zur Erhöhung der
Prozessrobustheit bei der Innenhoch-
druck-Umformung von flächigen Halb-
zeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten
Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten
Produktionskonzeptes für mobile
Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsunter-
suchungen, Prüfabläufen und Nachar-
beitsprozessen in der Elektronikproduk-
tion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

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

Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreibschweißen von walzplattiertem
Halbzeug und Aluminiumblech zur
Herstellung flächiger Aluminiumschaum-
Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt
Seriennahe Auslegung von Aluminium
Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann
Qualitative und quantitative Bewertung
der 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 Laserdurchstrahl-
schweißen thermoplastischer Kunststoffe
LFT, 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 Betauung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüßler
Verbindungs- und Systemtechnik für thermisch hochbeanspruchte und miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti
Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innhochdruck-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 Laserstrahlintern 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 Ver-
sagens von Punktschweißverbindungen
bei höchstfesten Stahlgüten
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser
Ein Ansatz zur Herstellung von
pressgehärteten Karosseriekomponenten
mit maßgeschneiderten mechanischen
Eigenschaften: Temperierte Umform-
werkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimu-
lation 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 Kupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerk-
stoffen - Umformverhalten und Grenzen
der Biegebarkeit
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-339-9.

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

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

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

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

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

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

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

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

Band 239: Rajesh Kanawade
In-vivo Monitoring of Epithelium
Vessel and Capillary Density for the
Application of Detection of Clinical
Shock and Early Signs of Cancer Develop-
ment
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 Kühl
Flexible Automatisierung der Statorenmontage mit Hilfe einer universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

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

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

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von 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 Metaldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-380-1.

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

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

Band 264: Matthias Domke
Transiente physikalische Mechanismen
bei der Laserablation von dünnen
Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz
Community-basierte Optimierung des
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 aushärtbarer
Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert
Erweiterung und Verbesserung von Ver-
suchs- und Auswertetechniken für die
Bestimmung von Grenzformänderungs-
kurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus
Erstellung eines Werkstofforientierten
Fertigungsprozessfensters zur Steigerung
des Formgebungsvermögens von Alumi-
niumlegierungen unter Anwendung einer
zwischeneschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec
Untersuchungen zur Herstellung von
funktionsoptimierten Bauteilen im
partiellen Presshärtprozess mittels lokal
unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader
Grundlegende Untersuchungen zur
Verschleißcharakterisierung beschichte-
ter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela
Untersuchung von Magnetfeld-Messme-
thoden zur ganzheitlichen Wertschöp-
fungsoptimierung 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 disk-
ret 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
LFT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-408-2.

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

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

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

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der
tribologischen Bedingungen in der
Blechmassivumformung - Bereitstellung
von tribologischen Modellversuchen und
Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-412-9.

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

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

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

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von
Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-417-4.

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

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

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

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der
Lasermikromaterialbearbeitung –
Grundlegende Untersuchungen und
Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-423-5.

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

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

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

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

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

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unter-
stützten Fertigungskette zur Herstellung
umgeformter Bauteile aus der höherfes-
ten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-429-7.

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

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling,
Simulation and Optimization of Molded
Interconnect Devices (MID) Based on
Laser Direct Structuring (LDS) / Experi-
mentelle Untersuchung, Modellierung,
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 Magnesium-
legierung AZ31B für die numerische
Prozessauslegung
LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-433-4.

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

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

Band 309: Martin Müller
Untersuchung des kombinierten Trenn-
und Umformprozesses beim Fügen art-
ungleicher 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-Drahtbond-
technologie für integrierte Leistungs-
module in harschen Umgebungs-
bedingungen
FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

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

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

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

Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter 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 Gnihl
Modellbasierte Prozesskettenabbildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbauteile
LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm
Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transienter optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz
Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner
Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger
Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn
Qualität und Zuverlässigkeit 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 Prozess-
überwachung auf Basis sozio-cyber-phy-
sischer Systeme
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski
Grundlegende Untersuchungen zum
Prozess- und Werkstoffverhalten bei
schwingungsüberlagerter Umformung
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier
Ganzheitliches ontologiebasiertes
Wissensmanagement im Umfeld der
industriellen Produktion
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab.
2020. ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr
Datenerfassung für die Anwendung
lernender Algorithmen bei der Herstel-
lung von Blechformteilen
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab.
2020. ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener
Kaltfließpressen von gerad- und schräg-
verzahnten Zahnrädern
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-287-1.

Abstract

Cold forging of spur and helical gears

For gear manufacturing, cutting processes are used as standard due to the achievable manufacturing accuracy. Considering economic and ecological aspects, cold forging offers an alternative due to shorter production cycles and increased material efficiency. In addition, cold forged gears are more loadable in operation due to process-related hardening and a fiber-like microstructure. One variant of forward extrusion for the production of gears is the so-called "Samanta"-process. The decisive advantage of this process compared to conventional transverse and forward extrusion is that no ejection process is required. In addition to a positive effect on the achievable quantity output, an influence on the component accuracy is avoided during the ejection of the formed components out of the tool system. To apply the "Samanta"-process in industry, the achievable gearing quality and tool life have to be increased. Therefore, this work focuses on the determination of functional relationships between gear parameters and process variables in order to generate a fundamental process understanding for cold forging of gears in the "Samanta"-process. The research of methods for the beneficial influencing of the process result in order to derive practice-relevant recommendations for process design is also a key aspect of this work.

Zur Zahnradherstellung kommen aufgrund der erreichbaren Fertigungsgenauigkeit standardmäßig spanende Verfahren zur Anwendung. Unter wirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten bietet das Kaltfließpressen aufgrund kürzerer Fertigungszyklen und erhöhter Materialeffizienz eine Alternative. Zudem sind kaltfließgepresste Zahnräder durch eine prozessbedingte Verfestigung und eine faserähnliche Gefügestruktur im Einsatz belastbarer. Eine Variante des Vorwärtsfließpressens zur Herstellung von Zahnrädern ist das sogenannte „Samanta“-Verfahren. Der entscheidende Vorteil dieses Prozesses gegenüber klassischen Quer- und Vorwärtsfließpressverfahren besteht darin, dass kein Auswerfervorgang erforderlich ist. Neben einem positiven Effekt auf die erreichbare Mengenleistung wird eine Beeinflussung der Bauteilgenauigkeit beim Auswerfen der umgeformten Bauteile aus dem Werkzeugsystem vermieden. Um das „Samanta“-Verfahren in der Industrie einsetzen zu können, sind die erzielbare Verzahnungsqualität und die erreichbaren Werkzeugstandmengen zu steigern. Vor diesem Hintergrund fokussiert diese Arbeit auf die Ermittlung von funktionalen Zusammenhängen zwischen Zahnradparametern und Prozessgrößen zur Schaffung eines grundlegenden Prozessverständnisses für das Kaltfließpressen von Zahnrädern im „Samanta“-Verfahren. Auch ist die Erforschung von Methoden zur vorteilhaften Beeinflussung des Prozessergebnisses für die Ableitung von praxisrelevanten Empfehlungen zur Prozessauslegung ein zentraler Bestandteil dieser Arbeit.

ISBN 978-3-96147-287-1

