

Untersuchungen zur Herstellung von komplexen Antriebsbauteilen durch Präzisionsschmieden

Vom Fachbereich Maschinenbau
der Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur
genehmigte Dissertation
von

Dipl.-Ing. Guido Dreyer

geboren am 17. Juni 1969 in Hannover

2002

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. M. Gietzelt

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. E. Doege

2. Referent: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. H. K. Tönshoff

Datum der mündlichen Prüfung: 17. Juli 2002

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Universität Hannover.

Dem Leiter des Institutes, Herrn Prof. Dr.-Ing. E. Doege, gilt mein besonderer Dank für die Anregung zu dieser Arbeit sowie die wertvolle Unterstützung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. mult. Tönshoff danke ich für die Durchsicht der Arbeit und die Übernahme des Koreferates. Ebenso gilt mein Dank Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Gietzelt für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Für die kritische Durchsicht der Arbeit sowie die vielfältigen Anregungen möchte ich besonders den Herren Hornhardt, Meiners und Huinink danken. Ferner danke ich allen Mitarbeitern des Institutes für die gute Zusammenarbeit in den letzten Jahren.

Mein besonderer Dank gilt meinen Eltern und meiner Frau Ursula, die mir den Weg für meinen Werdegang eröffneten und durch Ihre Unterstützung und Rücksichtnahme diese Arbeit erst ermöglicht haben.

Hannover, im Juli 2002

Guido Dreyer

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort	III
INHALTSVERZEICHNIS	V
Abkürzungs- und Formelverzeichnis	VII
Abstract	IX
1 Einleitung	1
2 Zielsetzung und Aufgabenstellung	2
3 Ausgangssituation und Stand der Technik	4
3.1 Potentiale des Präzisionsschmiedens	8
3.2 Umformtechnische Herstellung von Schalt-/ Steckverzahnungen	13
3.3 Umformtechnische Herstellung von Laufverzahnungen	14
3.3.1 Kaltwalzen	14
3.3.2 Fließpressen	15
3.3.3 Präzisionsschmieden	16
4 Statistische Versuchsplanung	18
4.1 Auswahl einer geeigneten Versuchsmethodik	19
4.2 Vorgehensweise bei den Untersuchungen	19
4.3 Haupteffekte und Wechselwirkungseffekte	21
4.4 Varianzanalyse und Signifikanztest bei 2 ^k -Versuchsplänen	21
4.4.1 Ermittlung der Varianzkomponenten	22
4.4.2 Ermittlung der Versuchsstreuung	23
4.4.3 Signifikanztest	24
5 Untersuchungen zum Formfüllungsverhalten beim Präzisionsschmieden von Verzahnungen	25
5.1 Verifizierung der Konstruktion mit Hilfe der Finiten - Element - Methode	28
5.2 Versuchsaufbau	30
5.3 Durchführung der Versuche	31
5.3.1 Versuchsplanung	31
5.3.2 Schmiedeversuche	32
5.4 Auswertung der Versuche	32
5.4.1 Definition relevanter Bauteilmaße	33
5.4.2 Geometrieerfassung	33
5.4.3 Bewertung der Parametereinflüsse auf relevante Bauteilmaße	34
5.4.3.1 Kopfkreisdurchmesser	37

5.4.3.2	Ausgeformte Zahnbreite.....	40
5.4.4	Hinweise für die Prozessauslegung von verzahnten Bauteilen	42
6	Präzisionsschmieden von komplexen Antriebsbauteilen am Beispiel eines Pkw-Gangrades.....	44
6.1	Entwicklung eines Verfahrens zum Präzisionsschmieden von Pkw-Gangrädern	44
6.1.1	Anforderungen an präzisionsgeschmiedete Pkw-Gangräder	45
6.1.2	Anforderungen an das Werkzeugsystem	48
6.1.3	Auslegung des Werkzeugsystems	49
6.1.3.1	Erste Umformstufe	52
6.1.3.2	Einbringung des Hinterschnitts in die Kupplungsverzahnungsgeometrie (zweite Umformstufe).....	58
6.1.3.3	Finite – Elemente - Methode Simulation der Umformung.....	63
6.2	Experimentelle Untersuchungen zum Präzisionsschmieden von Pkw-Gangrädern	73
6.2.1	Beschreibung des Versuchsaufbaus	73
6.2.2	Einflussgrößen des Umformprozesses.....	75
6.2.3	Versuchsplanung	77
6.3	Auswertung der Versuchsergebnisse.....	78
6.3.1	Ergebnis der ersten Umformstufe	79
6.3.1.1	Bewertung der Einflussgrößen auf wesentliche Qualitätsmerkmale und Messgrößen.....	86
6.3.2	Ergebnis der zweiten Umformstufe	92
6.3.2.1	Umformergebnis im Bereich der Kupplungsverzahnung	93
6.3.2.2	Einfluss der zweite Umformstufe auf die Laufverzahnung	94
6.3.2.3	Bewertung der Umformergebnisse der zweiten Umformstufe.....	97
7	Zusammenfassung und Ausblick.....	98
8	Literaturverzeichnis	100

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

A, B, C		Parameter
A_{Kolben}	[mm ²]	Kolbenfläche
b	[mm]	Ausgeformte Zahnbreite
b_{rel}	[mm]	relative Zahnbreite
b_{ges}	[mm]	gemessene Zahnbreite
b_{Nenn}	[mm]	Nenngröße der Zahnbreite
c		Anzahl der Wiederholungen am Versuchspunkt
c_i		Anzahl der Wiederholungen am Versuchspunkt i
d	[mm]	Teilkreisdurchmesser
d_a	[mm]	Kopfkreisdurchmesser
$d_{a,\text{ges}}$	[mm]	Ermittelter Kopfkreisdurchmesser
$d_{a,\text{Nenn}}$	[mm]	Nennmaß Kopfkreisdurchmesser
$d_{a1,i}; d_{a2,i}$	[mm]	Gemessener Kopfkreisdurchmesser
d_b	[mm]	Grundkreisdurchmesser
d_f	[mm]	Fußkreisdurchmesser
DIN		Deutsches Institut für Normung
FG		Freiheitsgrad
$f_{h\alpha}$	[μm]	Profil-Winkelabweichung
$f_{h\beta}$	[μm]	Flankenlinien-Winkelabweichung
F_p	[μm]	Teilungsgesamtabweichung
f_p	[μm]	Teilungseinzelabweichung
F		Testgröße
F_r	[μm]	Rundlaufabweichung einer Verzahnung, in den Zahnlücken gemessen
F_{Um}	[kN]	Umformkraft
F_α	[μm]	Profil-Gesamtabweichung
F_β	[μm]	Flankenlinien-Gesamtabweichung
IT		Internationale Toleranz
k		Anzahl der Parameter
m		Versuchswiederholungen
m_n	[mm]	Normalmodul
MQ		Mittlere Quadratsumme

n		Anzahl der Parameterstufen
$n_1; n_2$		Anzahl Messwiederholungen
Nfz		Nutzfahrzeug
Pkw		Personenkraftwagen
$p_{hydr.}$	[Mpa]	Hydraulikdruck
QS		Qualitätsstufe
SQ		Summe der Quadrate der Abweichungen
s_1^2, s_2^2		Stichprobenvarianzen
\bar{s}_i^2		Versuchsstreuung (mittlere gewichtete Streuung)
s_i^2		Zeilenvarianz (Streuung am i-ten Versuchspunkt)
v		Versuchszahl
v-Stößel	[mm/s]	Stößelgeschwindigkeit
$v_1 = k - 1$		Freiheitsgrad der Variationsquelle
$v_2 = N(c - 1)$		Freiheitsgrad der Versuchsstreuung
w		Gesamtversuchszahl
x	[mm]	Profilverschiebung
y		Mess- bzw. Zielgröße
\bar{y}_i		Mittelwert von y am i-ten Versuchspunkt (Zeilenmittelwert)
y_{ij}		Messwert am i-ten Versuchspunkt
y_{ijk}		beobachteter Wert
Z		Zähnezahl
ZG		Zahngeometrie
α_0	[°]	Eingriffswinkel
α_i		Beitrag von A auf der i-ten Stufe (Effekt von A)
$(\alpha\beta)_{ij}$		Abweichung von der Additivität bezüglich $\mu + \alpha_i + \beta_j$ (Wechselwirkungseffekt AB)
β_j		Beitrag von B auf der j-ten Stufe (Effekt von B)
β_0	[°]	Schrägungswinkel
ε_{ijk}		Versuchsstreuung
μ		wahrer Mittelwert aller Versuche

Abstract

Durch die Veränderungen der wirtschaftlichen Konstellation auf dem globalen Markt in den letzten Jahren sind die Produzenten von Waren aller Art gezwungen, sich dem steigenden Kostendruck durch Modifikation der Fertigung sowie durch Entwicklungen neuartiger Produkte und Verfahren zu erwehren.

Dies führte bereits in der Vergangenheit zu Innovationsprozessen in den verschiedensten Bereichen der Fertigungstechnik. Hierbei wurden neben der kontinuierlichen Verbesserung von Prozessen auch neuartige Verfahren zur Herstellung von etablierten Bauteilen sowie neue Produkte entwickelt, die bei gleicher Funktionalität Vorteile bei der Fertigung und im Einsatz brachten.

Gerade vor dem Hintergrund der Thematik „Leichtbau“ kommt der umformtechnischen Fertigung von komplexen Bauteilen wegen ihrer höheren Festigkeit und ihrer Möglichkeit der kompakteren Bauweise eine große Bedeutung zu [2/3/4/5]. Außerdem ist der „Substitutionswettbewerb“ eine große Herausforderung für die Schmiedeunternehmen, bei dem die unterschiedlichen Fertigungsverfahren (z. B. Massivumformung, Blechumformung, Giessen, Zerspanen, etc.) in Konkurrenz zueinander stehen.

Ziel dieser Arbeit ist es, den Nachweis zu erbringen, dass die endkonturnahe Herstellung eines komplexen verzahnten Bauteils der Antriebstechnik (Pkw-Gangrad) auf umformtechnischem Wege durch Präzisionsschmieden möglich ist. Auf diese Weise soll gezeigt werden, dass das Präzisionsschmieden eine Verfahrensalternative zur Herstellung komplexer Antriebsbauteile darstellen kann.

Die Geometrie des ausgewählten Pkw-Gangrads weist zwei unterschiedliche Verzahnungstypen auf. Zum einen die Schaltverzahnung, die für die formschlüssige Verbindung von Rad und Schaltmuffe ausgelegt ist. Zum anderen die schräge Laufverzahnung, die durch eine Abwälzbewegung die Antriebsleistung zum Abtrieb überträgt.

Innerhalb dieser Arbeit wird ein Verfahren zur Herstellung komplexer Antriebsbauteile durch Präzisionsschmieden am Beispiel eines Pkw-Gangrades entwickelt und dargestellt. Für die Auslegung der Prozesse im Vorfeld der Schmiedeversuche wurde die Finite-Elemente-Methode-Simulation (FEM) genutzt.

Mit Hilfe des beschriebenen Präzisionsschmiedeverfahrens wurde innerhalb dieser Arbeit die endkonturnahe Fertigung des komplex gestalteten Pkw-Gangrades, welches für die spanende Fertigung konstruiert wurde, realisiert. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass das Präzisionsschmieden von verzahnten hochbelasteten Bauteilen innerhalb enger geforderter Toleranzen möglich ist. Durch fertigungsgerechte Konstruktion der herzustellenden Bauteile kann die Wirtschaftlichkeit des Präzisionsschmiedeverfahrens gesteigert werden.

Schlagwörter: Präzisionsschmieden, Verzahnungen, Formfüllung

Abstract

During the past few years changes of the economic constellation on the global market forced producers of all product ranges to react to the growing pressure on costs by modifying the production and development of new products and procedures.

In the past this already led to innovative processes in various areas of manufacturing technology. Next to the continuing advancement of processes new procedures for the development of established parts and new products were also developed, which offered improvements in process and application while providing the same functionalities as before.

Especially against the background of the theme of "light weight construction" the deformation technological manufacture of complex parts gains greater importance because of their greater stability and possibility for more compact construction /2/3/4/5/. Also the „competition of substitution“ means a great challenge for forging manufacturers, where different manufacturing processes (e.g. solid forming, sheet metal forming, casting, metal cutting and so forth) are competing.

Aim of this investigation is to provide the evidence that the production of close-to-contour parts with complex toothed designs for the motive power engineering (escape wheels for cars) is possible to reach through deformation technology by precision forging. This should prove that precision forging can be an alternative method in the manufacture of complex driving components.

The geometry of selected car escape wheels shows two different types of gearings. On the one hand is the clutch tooth that is designed for a positive-fitting connection between gear and coupling sleeve. On the other hand is the helical running gear, which transmits the driving power by a roll off movement

In the course of this investigation a method for the production of complex driving components through precision forging is developed and introduced at the example of a car escape wheel. For the design of the process before the forging tests the Finite-Element-Analysis (FEA) was used.

With the help of the described process of precision forging the close-to-contour production of complex designed car escape wheels, which was constructed for metal-cutting manufacturing, was realized in the course of this investigation. The results of the investigation show that precision forging of toothed, heavily stressed parts is possible within the required narrow tolerances. Through a construction of the parts that meets the requirements of the production the profitability of the precision forging process can be increased.

Key words: Precision forging, Gearing, Form filling

1 Einleitung

Durch die Veränderungen der wirtschaftlichen Konstellation auf dem globalen Markt in den letzten Jahren sind die Produzenten von Waren aller Art gezwungen, sich dem steigenden Kostendruck durch Modifikation der Fertigung sowie durch Entwicklungen neuartiger Produkte und Verfahren zu erwehren.

Dies führte bereits in der Vergangenheit zu Innovationsprozessen in den verschiedensten Bereichen der Fertigungstechnik. Hierbei wurden neben der kontinuierlichen Verbesserung von Prozessen auch neuartige Verfahren zur Herstellung von etablierten Bauteilen sowie neue Produkte entwickelt, die bei gleicher Funktionalität Vorteile bei der Fertigung und im Einsatz brachten.

Seit Jahren werden die Gesenkschmieden in Deutschland mit der Forderung von Kunden konfrontiert, einbaufertige Bauteile zu liefern. Diesem Wunsch kommt die Schmiedeindustrie in Deutschland zunehmend nach. Wurden noch vor 10 Jahren nur ca. 10 % der Bauteile bei den Schmiedebetrieben spanend nachbearbeitet, so waren es im Jahr 1999 bereits 20 %. Des Weiteren bleibt das Thema der „Fertigungstiefe“ für die Schmieden weiter hochaktuell, da hierdurch eine erhöhte Wertschöpfung in den Bereich der Schmiedeunternehmen verlagert wird, welche die Wettbewerbsfähigkeit der Gesenkschmieden gegenüber rein spanenden Betrieben deutlich erhöht /1/.

Gerade vor dem Hintergrund der Thematik „Leichtbau“ kommt der umformtechnischen Fertigung von komplexen Bauteilen wegen ihrer höheren Festigkeit und ihrer Möglichkeit der kompakteren Bauweise eine große Bedeutung zu /2/3/4/5/. Außerdem ist der „Substitutionswettbewerb“ eine große Herausforderung für die Schmiedeunternehmen, bei dem die unterschiedlichen Fertigungsverfahren (z. B. Massivumformung, Blechumformung, Giessen, Zerspanen, etc.) in Konkurrenz zueinander stehen.

Das Präzisionsschmieden bietet das Potential, den Anforderungen der Kunden nach Produkten mit einer endkonturnahen Geometrie, kombiniert mit den positiven Eigenschaften von geschmiedeten Bauteilen, gerecht zu werden. Durch die in den letzten Jahrzehnten fortschreitende durchgängige Verwendung von CA-Techniken in der Werkzeugauslegung und -fertigung sowie der Prozessüberwachung /6/ erhält das Gesenkschmieden als Near-Net-Shape-Verfahren neue Impulse. Es ist möglich, Bauteile im Bereich der ISO-Toleranz (IT) 8-9, durch den Einsatz von Sondermaßnahmen wie z. B. dem Kaltkalibrieren sogar von IT 7, zu fertigen /7/. Dies ermöglicht eine deutlich erhöhte Wertschöpfung am Bauteil im Bereich des Prozessschrittes „Umformen“ und kann bei der Neugestaltung der „Prozesskette Präzisionsschmieden“ zu einer wirtschaftlicheren Fertigung von Serienbauteilen führen.

Am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Universität Hannover wurde gezeigt, dass das Präzisionsschmieden von geometrisch einfachen Stirnverzahnungen möglich ist /9/. Aufbauend auf den Ergebnissen

weitergehender Untersuchungen /6/10/11/ und vor dem Hintergrund des möglichen Einsparpotentials bei der Fertigung von verzahnten Bauteilen in der Massenfertigung durch Präzisionsschmieden, ist die Motivation zur Entwicklung eines sicheren Herstellprozesses sehr groß.

Die wirtschaftliche Bedeutung von Innovationen in der Fertigungstechnik für die Antriebstechnik (Herstellung von Zahnrädern, Getrieben und Lagern) in der Bundesrepublik Deutschland ist in Tabelle 1 anhand einiger Produktionswerte dargestellt.

Tabelle 1: Werte der Produktion von Lagern, Getrieben und Antriebselementen sowie Wälzlager in der Bundesrepublik Deutschland /12/

Werte der Produktion in der Bundesrepublik Deutschland				
	Menge		Wert	
	1999	2000	1999	2000
Lager, Getriebe, Zahnräder und Antriebselemente	620.000 t	662.000 t	6,370 Mrd. €	6,942 Mrd. €
Wälzlager	-	-	2,633 Mrd. €	2,884 Mrd. €

In der Bundesrepublik Deutschland betrug im Jahr 2000 der Wert der Fertigung von Pkw-Getrieben 6,942 Milliarden Euro /12/. Aus produktionstechnischer Sicht ist somit eine vertiefende Untersuchung des Präzisionsschmiedens von verzahnten Antriebselementen von großer Bedeutung und stellt daher den Gegenstand dieser Arbeit dar.

2 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, den Nachweis zu erbringen, dass die endkonturnahe Herstellung eines komplexen verzahnten Bauteils der Antriebstechnik (Pkw-Gangrad) auf umformtechnischem Wege durch Präzisionsschmieden möglich ist. Auf diese Weise soll gezeigt werden, dass das Präzisionsschmieden eine Verfahrensalternative zur Herstellung komplexer Antriebsbauteile darstellen kann.

Für die Realisierung dieses Zieles sind folgende Grundlagen zu erarbeiten:

- Ermittlung des Formfüllungsverhaltens verschiedener Verzahnungsgeometrien (Modellwerkzeug),
- Entwicklung eines Verfahrens zum Präzisionsschmieden von Pkw-Gangrädern.

Die Untersuchungen wurden an einem Pkw-Gangrad (Bild 1) durchgeführt, da hier die Anforderungen an das Herstellungsverfahren „Präzisionsschmieden“ in Bezug auf die Fertigungsgenauigkeit besonders hoch sind.

Die Geometrie des ausgewählten Pkw-Gangrads weist zwei unterschiedliche Verzahnungstypen auf. Zum einen die Schaltverzahnung, die für die formschlüssige Verbindung von Rad und Schaltmuffe ausgelegt ist. Zum anderen die schräge Laufverzahnung, die durch eine Abwälzbewegung die Antriebsleistung zum Abtrieb überträgt. Der Stand der Technik zur umformtechnischen Herstellung dieser Verzahnungen ist in den Abschnitten 3.2 und 3.3 beschrieben.

Die Geometriemaße und Toleranzen der einzelnen Verzahnungen, wie z. B. Rundlauf und Profileingriffswinkel, die innerhalb eines Werkzeugteils (z.B. Ober- oder Untergesenk) abgeformt werden müssen, sind sehr stark von der exakten Prozessauslegung, wie z. B. Werkzeuggeometrie und Einhaltung der Prozessparameter, abhängig. Geometrien, die über mehrere Werkzeu-
 glemente abgeformt werden, sind ebenfalls exakt abzubilden und stellen dadurch hohe Anforderungen an die konstruktive Auslegung der Werkzeuge. Während des Umformvorganges ist eine sehr genaue, reproduzierbare Positionierung der Werkzeu-
 glemente zueinander erforderlich. Die Prozessauslegung muss so gestaltet sein, dass die Qualität der Bauteile durch Schwankungen einzelner Prozessgrößen innerhalb gewisser Grenzen nicht beeinträchtigt wird.

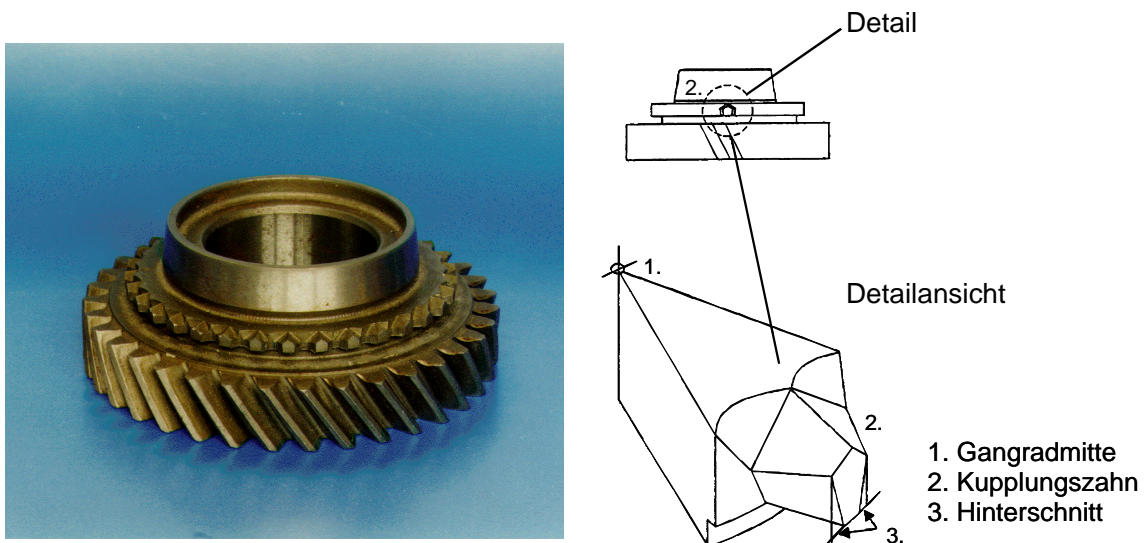


Bild 1: Pkw-Gangrad (spanend hergestellt) und Detailansicht des Kupplungszahns

Für die Untersuchung der Herstellbarkeit des in **Bild 1** abgebildeten Pkw-Gangrads durch Präzisionsschmieden leitet sich die im Folgenden beschriebene Vorgehensweise ab. Diese gliedert sich in die Untersuchungspunkte:

- **Untersuchungen zum Formfüllungsverhalten beim Präzisions-
 schmieden von Verzahnungen**
 Zunächst gilt es anhand von einfach verzahnten Geometrien Untersuchungen zum Formfüllungsverhalten von filigranen Bauteilen durchzuführen. Es werden Einflüsse der Versuchsparameter Umformtemperatur und

Umformgeschwindigkeit auf die Ausformung der Bauteile untersucht. Dies erfolgt mit Hilfe der vollfaktoriellen Versuchsplanung.

- **Entwicklung eines Verfahrens zum Präzisionsschmieden von Pkw-Gangrädern**

Entwicklung und Konzeption eines Verfahrens für das Präzisionsschmieden des gewählten Bauteils schließen sich an. Hierbei spielen die besonderen Anforderungen an das Werkzeugsystem auf Grund der komplexen Geometrie eine grundlegende Rolle.

- **Experimentelle Untersuchungen zum Präzisionsschmieden von Pkw-Gangrädern**

Die experimentellen Untersuchungen des Präzisionsschmiedens von Pkw-Gangrädern sollen Aufschluss über die optimalen Umformparameter geben.

Begleitend werden Simulationen mit Hilfe der Finiten-Element-Methode durchgeführt, um nähere Erkenntnisse über den Umformprozess zu erlangen. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag zur prozessgerechten Auslegung von Präzisionsschmiedeprozessen leisten. Hierdurch werden dem Konstrukteur Möglichkeiten zur umformtechnischen Herstellung von Antriebsbauteilen aufgezeigt.

Die Vorgehensweise zur Erreichung der beschriebenen Ziele ist in Bild 2 dargestellt.

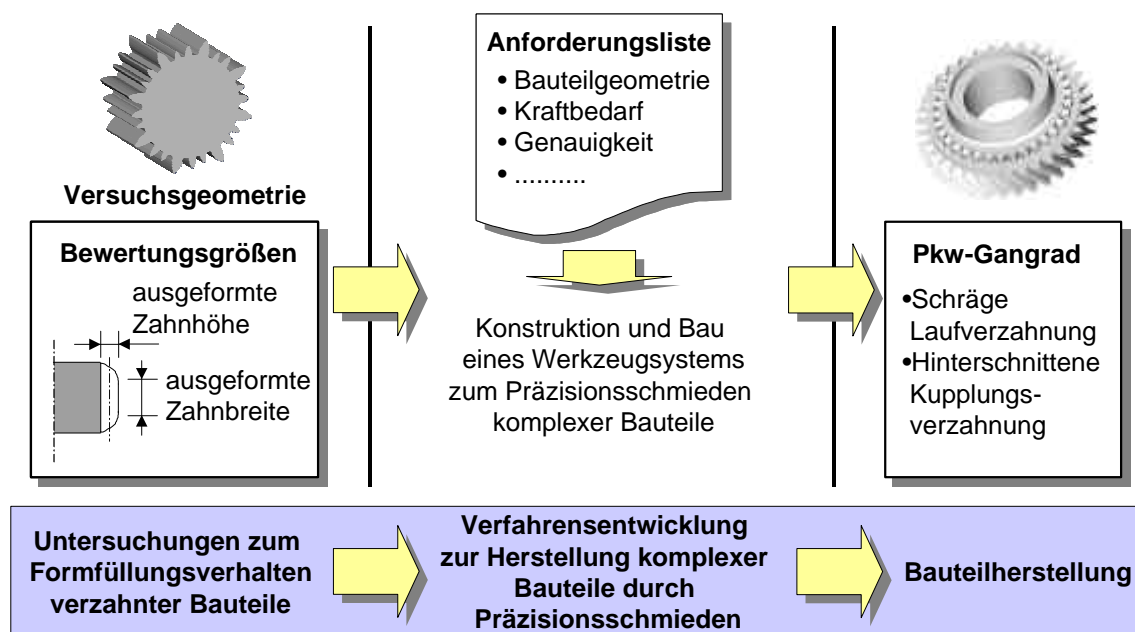


Bild 2: Vorgehensweise

3 Ausgangssituation und Stand der Technik

Die Optimierung von Fertigungsprozessen orientiert sich heute neben technologisch-wirtschaftlichen zunehmend auch an umweltpolitischen

Aspekten. Energie- und rohstoffsparende Produktionsverfahren gewinnen stark an Bedeutung. Zu diesen zählt das Präzisionsschmieden komplexer Bauteile mit nahezu einbaufertigen Funktionsflächen, da es sich auf Grund der hohen Produktivität, der günstigen Materialausnutzung und den vorteilhaften technologischen Produkteigenschaften auszeichnet /3/13/. Für hochbelastete Bauteile des Motoren- und Triebwerkbaus, die überwiegend in großen Serien gefertigt werden, bietet sich das Präzisionsschmieden besonders durch seinen verfahrensbedingten, festigkeitssteigernden Einfluss auf die Bauteile an /5/7/14/.

In der heutigen Prozesskette zur Herstellung verzahnter Antriebsbauteile, wie z. B. eines Pkw-Gangrades, ist die Umformtechnik bisher überwiegend in der Vorformherstellung vertreten (Bild 3).

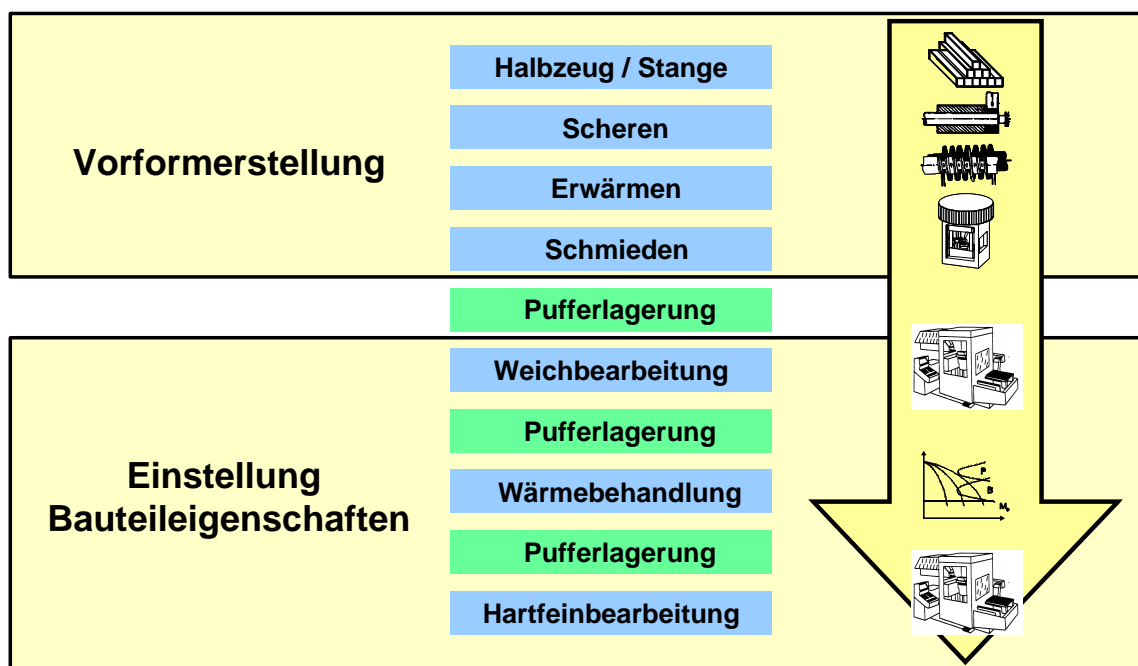


Bild 3: Konventionelle Prozesskette zur Herstellung komplexer Hochleistungsbauteile

Komplexe Verzahnungsbauteile werden meist aus geschmiedeten, unverzahnnten Rohteilen durch spanende Weichbearbeitung, wie z. B. Wälzfräsen und Wälzstoßen, hergestellt /15/. Geschmiedete Rohteile finden in diesem Zusammenhang Anwendung, da sie verfahrensbedingt ein porenfreies Gefüge besitzen und damit für hochbelastete Bauteile prädestiniert sind. Durch schnelllaufende automatisierte Pressen (z. B. Hatebur Pressen) lassen sich solche Bauteile kostengünstig herstellen. Bild 4 zeigt eine geschmiedete Vorform und das durch Weichbearbeitung hergestellte verzahnte Bauteil.



Bild 4: Geschmiedete Vorform und weichbearbeitetes Zahnrad (Volkswagen)

Durch die spanende Weichbearbeitung wird die verzahnte Geometrie in die Rohteile eingebracht. Im Anschluss an diesen Fertigungsschritt erfolgt eine Wärmebehandlung, in der die finalen Bauteileigenschaften in Bezug auf die Werkstoffcharakteristik eingestellt werden. Innerhalb der Wärmebehandlung kommt es, hervorgerufen durch Eigenspannungen und Verzüge, zu Geometrieabweichungen insbesondere im Bereich der Verzahnung, die die Qualität der Vorverzahnung um etwa eine Qualitätsstufe verschlechtert. Um diesen Qualitätsverlust auszugleichen und zur Erzeugung der geforderten Oberflächenqualität findet im Bereich der Funktionsflächen abschließend eine spanende Hartfeinbearbeitung (z. B. Schleifen, Hartdrehen) statt.

Bei diesem abschließenden Fertigungsschritt wird die Endgeometrie der Verzahnung erzeugt, die abhängig vom Einsatzfall im Bereich von IT 5-8 liegen kann.

Die Entwicklung der umformtechnischen Herstellung von verzahnten Bauteilen weist in der letzten Zeit deutliche Fortschritte auf. So werden heute bereits in vielen Getrieben Gangräder mit umformtechnisch hergestellten Schaltverzahnungen eingesetzt.

Bei dieser Art der Verzahnung kommt es zu keiner Abwälzbewegung der im Eingriff befindlichen Zähne, sondern zu einem Formschluss während der Kraftübertragung. Aus diesem Grund ist hier eine Qualität der Verzahnung von IT 8-9 ausreichend.

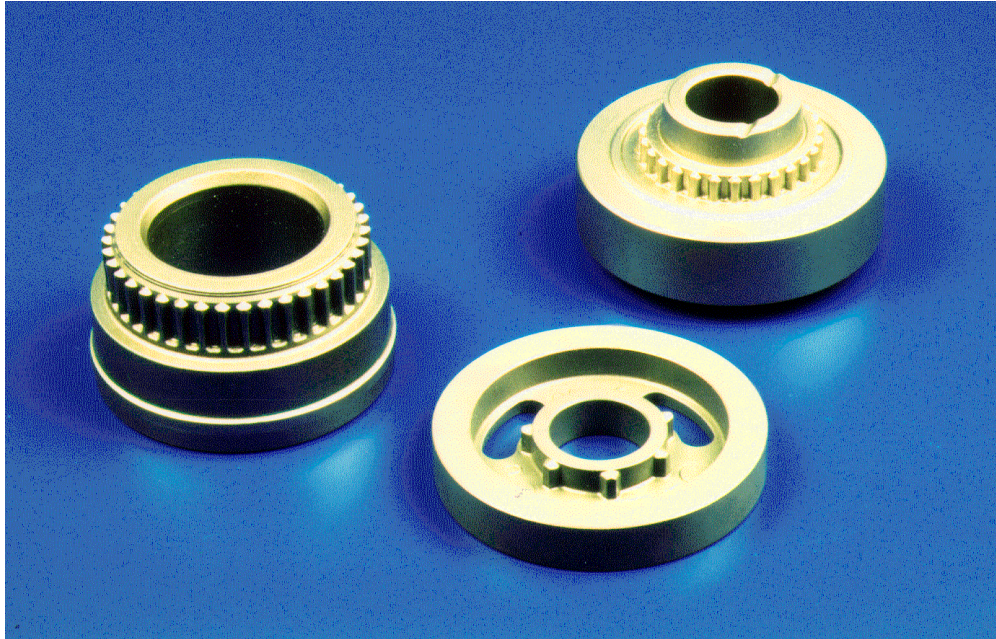


Bild 5: Umformtechnisch hergestellte Bauteile mit einbaufertiger Schaltverzahnung /27/

Die Schaltverzahnung liegt bei den in **Bild 5** gezeigten umformtechnisch gefertigten Bauteilen einbaufertig vor. Gegenüber den gespanten Verzahnungen sind die Zähne bei dieser Herstellweise angebunden ausgeführt.

Die umformtechnische Herstellung von verzahnten Elementen aus dem Antriebsstrang von Pkw und Nfz im Bereich der Kegelräder ist bei der Kaltumformung bereits zum Stand der Technik zu zählen (vgl. **Bild 7**). Viele umformtechnische Betriebe liefern diese und ähnliche Bauteile an die Automobilindustrie. Als Beispiel sind Kegelräder exemplarisch in **Bild 6** dargestellt.



Bild 6: Umformtechnisch hergestellte Kegelräder (BLW)

Die Komplexität der Bauteile ist bisher durch den erreichbaren Umformgrad der hier eingesetzten Kalt- und Halbwarmumformverfahren begrenzt. Der derzeitige erreichte Stand der wirtschaftlichen Umsetzung von verzahnten Bauteilen durch die Kaltumformung ist in **Bild 7** dargestellt. Es ist zu erkennen, dass mit steigender Komplexität der Geometrie die Genauigkeit der Fertigung abnimmt. Dies deutet darauf hin, dass komplexe Bauteile durch Kaltumformung nicht

wirtschaftlich herstellbar sind, da die Formgebung bei der Kaltumformung begrenzt ist. Jedoch werden Untersuchungen zur umformtechnischen Herstellung von Stirnverzahnungen weltweit vorangetrieben, um die positiven Eigenschaften dieser Fertigungsmethode auch auf andere Bauteile zu übertragen /6/10/11/14/20/21/22/23/24/25/.

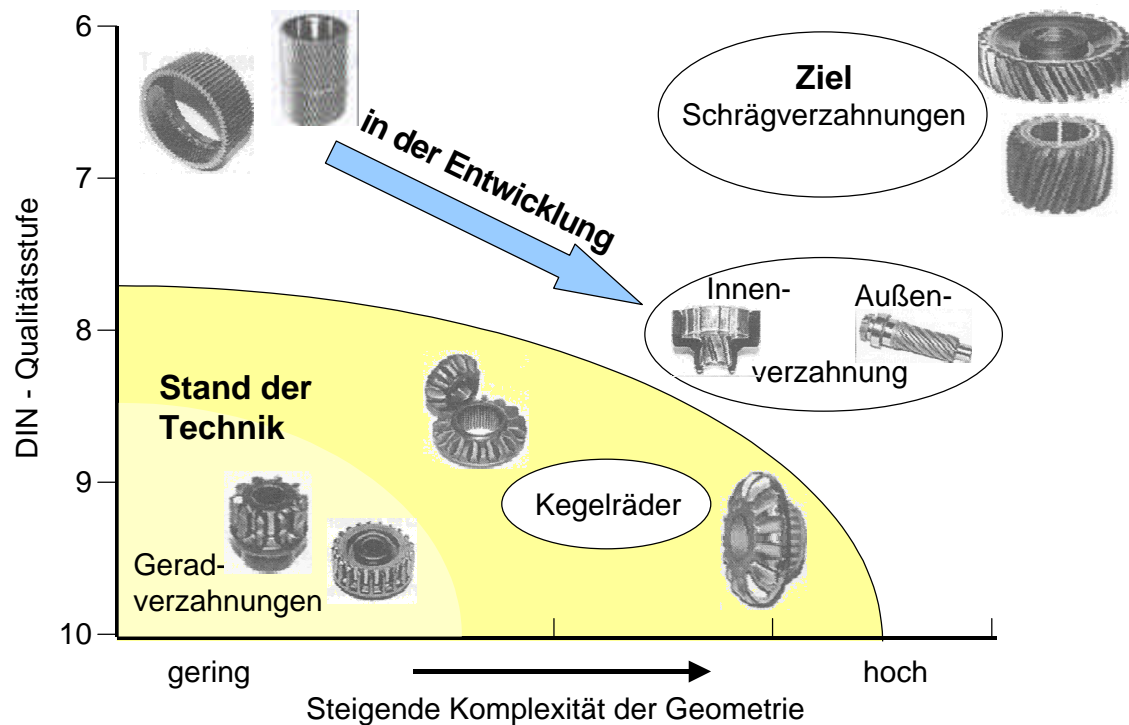


Bild 7: Stand der Technik bei der Kaltumformung von verzahnten Bauteilen
/19/

3.1 Potentiale des Präzisionsschmiedens

Eine Verbesserung der erreichbaren Genauigkeiten beim Präzisionsschmieden, die mittels durchgängiger Nutzung der CA-Techniken zusätzlich erleichtert wird, hilft, die abschließende spanende Bearbeitung stark zu reduzieren. Durch die gleichzeitige Weiterentwicklung der spanenden Hartfeinbearbeitung, bei der die Kosten durch erhöhte Abtragsleistungen bei geringerem Verschleiß der Werkzeuge gesenkt werden konnten, kann auf die spanende Weichbearbeitung der verzahnten Bauteile verzichtet werden.

Neben den oben beschriebenen Vorteilen, die die Umformtechnik im Allgemeinen bietet, zeigt das Fertigungsverfahren „Präzisionsschmieden“ weitere Vorteile auf. Diese sind:

- Höhere Werkstoffausnutzung gegenüber der spanenden Fertigung oder der Kombination von Gesenkschmieden und Zerspanen,
- Verringerung der Kosten bei der spanenden Bearbeitung, da Arbeitsgänge entfallen, wenn Funktionsflächen höherer Ordnung einbaufertig geschmiedet werden,

- neue konstruktive Gestaltungsmöglichkeiten durch Verwenden von Werkstückgeometrien, die spanend nur mit hohem Aufwand herstellbar sind,
- Reduzierung der Anzahl von Einzelteilen sowie der Werkstückmasse und des Einbauraumes durch Integration mehrerer Form- und Funktionselemente in ein Präzisionsschmiedestück.

Das Präzisionsschmieden bietet durch die erreichbaren Genauigkeiten die Möglichkeit, Funktionselemente endkonturnah herzustellen. Am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Universität Hannover wurden mit Hilfe des Präzisionsschmiedens die in Bild 8 gezeigten Bauteile hergestellt. Diese verzahnten Bauteile werden jeweils durch einen einstufigen Umformprozess gefertigt.



Bild 8: Am IFUM präzisionsgeschmiedete, verzahnte Bauteile

Wirtschaftliches Potential

Von den in Deutschland insgesamt produzierten Lagern, Getrieben, Zahnrädern und Antriebselementen im Wert von rund 7 Mrd. Euro (Tabelle 1) kommt der Fertigung von Zahnrädern als Basis des Getriebebaus eine zentrale Bedeutung zu. In von der Industrie und dem IFUM gemeinsam durchgeführten Wirtschaftlichkeitsberechnungen wurde ein Einsparpotential für präzisionsumgeformte schrägverzahnte Zahnräder gegenüber rein zerspanend hergestellten Zahnrädern von 20 bis 25 % nachgewiesen. Eine Kostenabschätzung für die Fertigung von einfachen Kegelrädern führte zu dem Ergebnis, dass bei Anwendung des Präzisionsschmiedens eine Kostenreduktion gegenüber der konventionellen Fertigung von ca. 15 % zu erzielen ist /3/.

Für die Fertigung anderer beispielhaft ausgewählter Hochleistungsbauteile wird das in Tabelle 2 aufgezeigte Einsparpotential veranschlagt.

Tabelle 2: Einsparpotential verschiedener Schmiedeteile /18/

Bauteil	Anzahl der gefertigten Teile pro Jahr	Einsparungspotential durch „Prozesskette Präzisionsschmieden“
Zahnräder	ca. 65 Mio.	ca. 20 - 25 %
Kurbelwellen	ca. 4,8 Mio.	ca. 20 %
Pleuel	ca. 25 Mio.	ca. 22 %

Leichtbaupotentiale

Durch die hohe zu übertragende Antriebsleistung der Fahrzeuggetriebe und das gleichzeitige Bestreben, immer leichtere Getriebe zu fertigen, steigen die Anforderungen an die verwendeten Bauteile. In den letzten Jahren wurden auf Grund der Kundennachfrage immer mehr Motoren mit höheren Abtriebsleistungen gefertigt. Dies führte zu größeren Getrieben, die zwangsläufig ein höheres Gewicht aufweisen (Tabelle 3). Die Verwendung von Bauteilen, die eine höhere Leistung bei geringeren geometrischen Abmaßen und geringerem Gewicht aufweisen, entspricht dem oben genannten „Leichtbaugedanken“. Diese Entwicklung ist durch das abnehmende spezifische Gewicht in Tabelle 3 zu erkennen. Hierbei sind umformtechnisch hergestellte Bauteile durch ihre fertigungsbedingt höhere Festigkeit für den Einsatz prädestiniert.

Tabelle 3: Gewichtsentwicklung von Pkw-Getrieben (nach Volkswagen)

Schaltgetriebe (Einführungsjahr)	Übertragbares Drehmoment, Nm	Gewicht (inkl. Öl), kg	spezifisches Gewicht, kg/Nm
MQ 250 (1996)	245	ca. 40,2	ca. 0,164
MQ 350 (1999)	310	ca. 50,0	ca. 0,161
MQ 200 (2002)	200	ca. 29,5	ca. 0,148

Um die besonderen konstruktiven Gestaltungsmöglichkeiten umgeformter Bauteile im Vergleich zu den zerspannten Bauteilen aufzuzeigen, sind in Bild 9 zwei Gangräder zu diesen Herstellverfahren dargestellt. Bild 9b zeigt die Möglichkeit zur Reduzierung der Bauteilhöhe durch Verlagerung der Schaltverzahnung in den Grundkörper der Laufverzahnung. Auf diese Weise ergibt sich eine sogenannte Anbindung der Verzahnung an den Grundkörper.

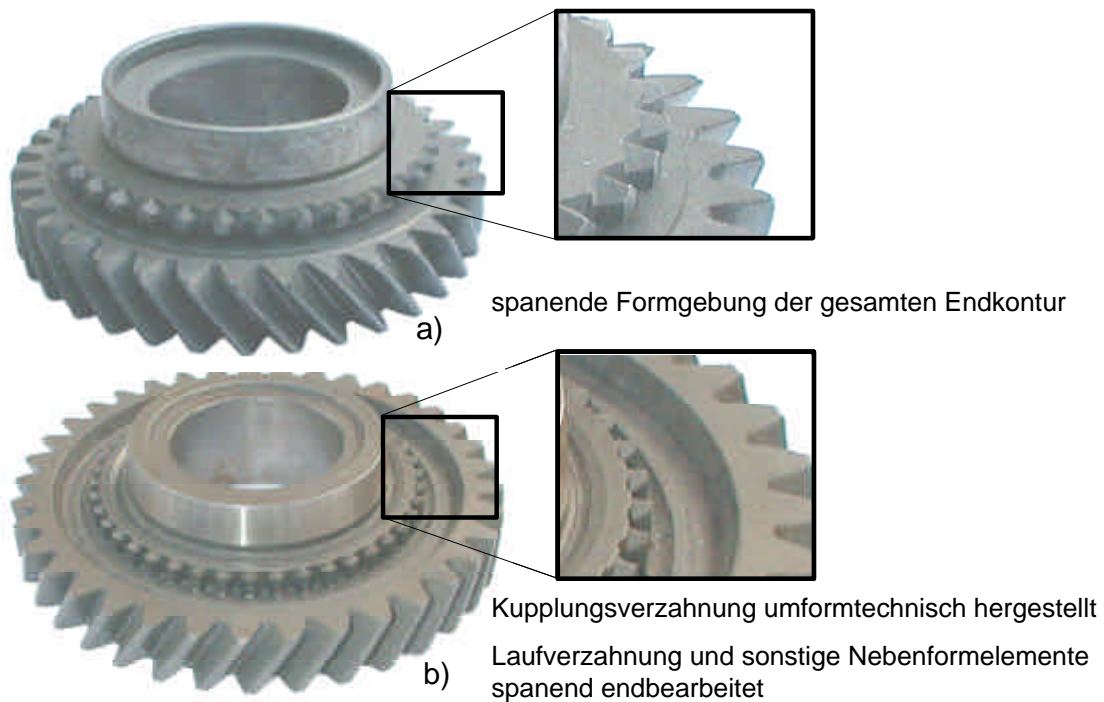


Bild 9: Gestaltungsmöglichkeiten von Gangrädern

- a) ausschließlich spanend und
- b) umformtechnisch (Kupplungsverzahnung)/
spanend hergestelltes Zahnrad (Laufverzahnung)

Neben der geringeren Dimensionierung von Getriebebauteilen bei Nutzung von Schmiedeteilen kann durch die fertigungsspezifischen Besonderheiten der Umformtechnik die Bauhöhe des gesamten Getriebes verringert werden /2/. Dies ist dadurch bedingt, dass bei der umformtechnischen Herstellung keine Werkzeugauslaufzonen benötigt werden und die Verzahnungen somit angebunden ausgeführt werden können. Die Verzahnung ist nicht nur im Bereich des Zahnfußes sondern auch an einer Stirnfläche mit dem Grundkörper verbunden (siehe Bild 9 und Bild 11), was die Steifigkeit der Verzahnung deutlich erhöht.

Diese Vorteile der Umformtechnik wurden bereits bei der Herstellung verschiedener, verzahnter Bauteile genutzt. In Bild 10 sind dazu beispielhaft Bauteile mit Kegelradverzahnungen abgebildet. Die Geometrie der abgebildeten Bauteile ist durch spanende Bearbeitung wirtschaftlich nicht herstellbar.



Bild 10: Bauteile, bei denen die Vorteile der umformtechnischen Herstellung in Bezug auf die Geometrie genutzt werden (BLW)

Neben der exakten Ausformbarkeit komplexer Geometrien besteht die Möglichkeit, Bauteile alternativ zu gestalten (**Bild 11**). Zudem können in der Konstruktion die folgenden Vorteile der umformtechnischen Fertigung genutzt werden:

- Herstellung von komplexen, hochbelastbaren Geometrien durch nicht benötigte Werkzeugauslaufzonen (angebundene Verzahnung),
- kleinere Dimensionierung durch höhere Festigkeit von Schmiedeteilen im Vergleich zu spanend hergestellten Bauteilen.

Am Beispiel eines Pkw-Gangrades ist dies in **Bild 11** dargestellt. Der Einsatz von Bauteilen, die in dieser Weise optimiert wurden, führt zu kleineren und somit auch leichteren Getrieben. Im Hinblick auf die Forderung nach Leichtbau im Automobilbau kann dieses Potential in Zukunft deutlich weiter ausgeschöpft werden.

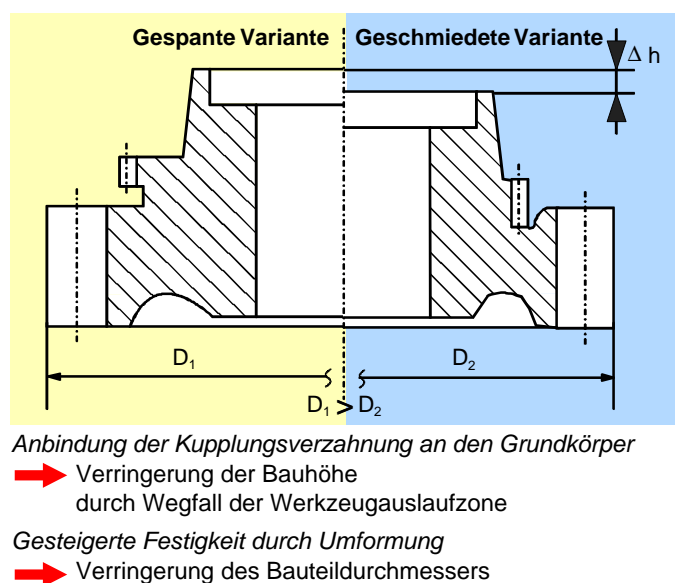


Bild 11: Gestaltungsmöglichkeiten eines durch Präzisionsschmieden hergestellten Bauteils

Für andere komplexe Antriebsbauteile ist das Potential in ähnlicher Weise vorhanden. Hier ist in Zukunft eine spezifische Auslegung der Bauteile auf das entsprechende Fertigungsverfahren zu realisieren, um die Herstellkosten weiter zu reduzieren.

3.2 Umformtechnische Herstellung von Schalt-/ Steckverzahnungen

Schalt- und Steckverzahnungen werden durch unterschiedliche Kaltfließpressverfahren, z. B. Querfließpressen, Vorwärtsfließpressen, Napfflößpressen, sowie durch Drückwalzen hergestellt.

Die Komplexität von Schalt- und Steckverzahnungen wird durch einen Hinterschnitt an der Verzahnung erhöht, der ein Abrutschen der Schaltmuffe verhindert und somit für die einwandfreie Funktion verantwortlich ist. Bislang wird der Hinterschnitt durch ein patentgeschütztes Verfahren /29/30/ eingebracht.

Der Kupplungszahn wird hierbei in einem ersten Schritt durch Fließpressen vorgeformt. Die Vorform ist dabei höher als der eigentliche Zahn. In einem zweiten Schritt wird das überstehende Material im Zahnkopf kontrolliert verdrängt, so dass an den Zahnflanken eine Ausbauchung auftritt, die den Hinterschnitt darstellt. Bei diesem Verfahren sind verschiedene Varianten möglich. Zwei dieser Varianten sind in Bild 12 bzw. Bild 13 dargestellt.

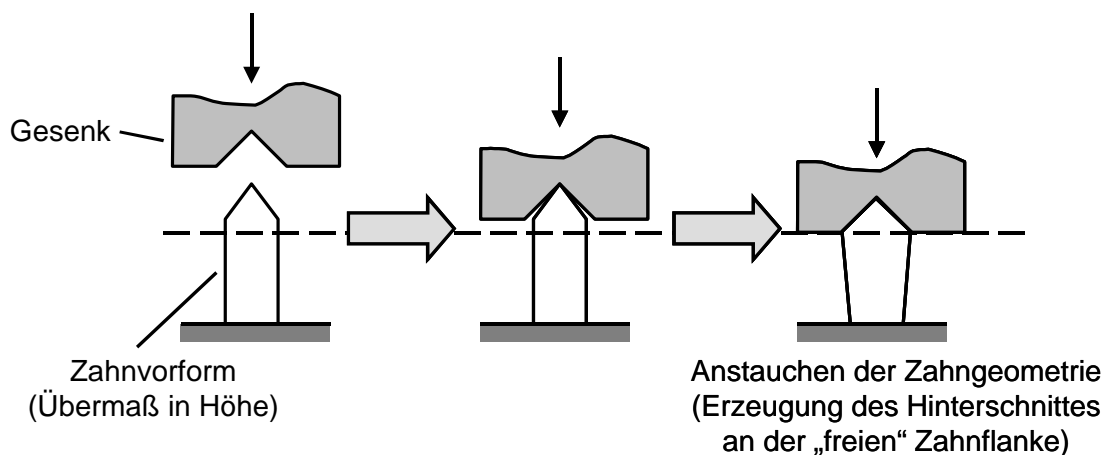


Bild 12: Ablauf der Herstellung von Hinterschnitten an einer Kupplungsverzahnung (nach /30/)

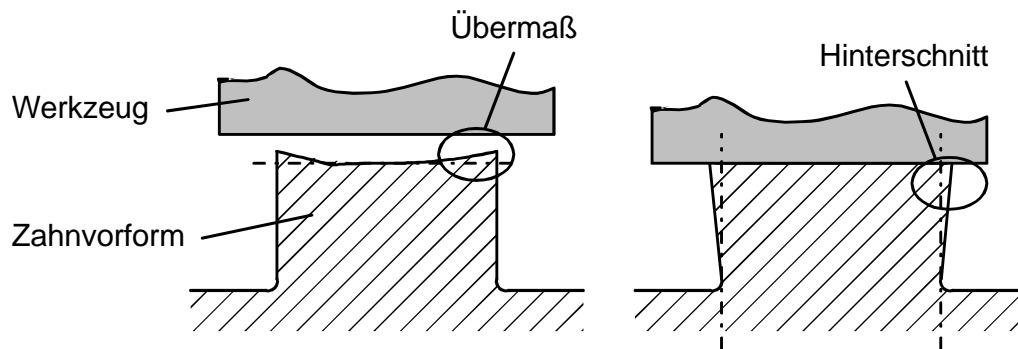


Bild 13: Hinterschnitterzeugung durch gezielte Materialverdrängung beim Stauchen (nach /29/)

Bei dieser Herstellungsweise wird die Zahnflanke durch ein freies Stauchen erzeugt. Dies führt bei nicht exakt eingehaltenen Prozessparametern zu Ungenauigkeiten, die die Funktion, z. B. durch ein Herausrutschen der Schaltmuffe, beeinträchtigen kann. Die für die Hinterschnitterzeugung benötigte Umformkraft wird durch den Grundkörper der Laufverzahnung geleitet. Dies kann unter Umständen zu Maßabweichungen an anderen Geometrien des Bauteils führen.

Die Steckverzahnung besitzt im Gegensatz zur Schaltverzahnung keinen Hinterschnitt an der Zahngeometrie. Sie wird überwiegend für die dauerhafte Kraftübertragung genutzt und kann ebenfalls bei Schaltvorgängen genutzt werden, wenn ein Herausrutschen der Verzahnung konstruktiv anderweitig verhindert wird. Bei der Herstellung von Steckverzahnungen können durch die recht einfache Geometrie der Verzahnung unterschiedliche Verfahren der Kalt- bzw. Halbwarmumformung zum Einsatz kommen.

3.3 Umformtechnische Herstellung von Laufverzahnungen

Umformtechnische Verfahren zur Herstellung von schnelllaufenden Verzahnungen sind bislang industriell wenig verbreitet. Es dominieren hier nach wie vor spanabhebende Fertigungsverfahren, da sehr hohe Anforderungen an die Maßgenauigkeit und die Oberflächenbeschaffenheit der Bauteile gestellt werden, um die gewünschten Eigenschaften, wie Laufruhe und Lebensdauer, zu erhalten /34/.

Bauteile mit Laufverzahnung stellen daher besonders hohe Anforderungen an den Umformprozess /35/. Untersuchungen verschiedener Stellen haben ergeben, dass Laufverzahnungen umformtechnisch durch **Kaltwalzen**, **Fließpressen** und **Schmieden (Präzisionsschmieden)** herstellbar sind /9/32/35/36/. Diese Verfahren werden im Folgenden näher beschrieben.

3.3.1 Kaltwalzen

Das Kaltwalzen gehört zu den weit verbreiteten Verfahren zur Herstellung von Verzahnungen. Man unterscheidet nach der Kinematik das Längs-, Quer- und als Kombination dieser Verfahren das Schrägwalzen. Beim Längswalzen wird

das Walzgut senkrecht zu den Walzachsen ohne Drehung durch den Walzspalt bewegt, während das Walzgut beim Querwalzen ohne Axialbewegung um seine eigene Achse gedreht wird /37/. Diese Verfahren werden vorwiegend zum Verzahnen von Wellen eingesetzt (Bild 14).

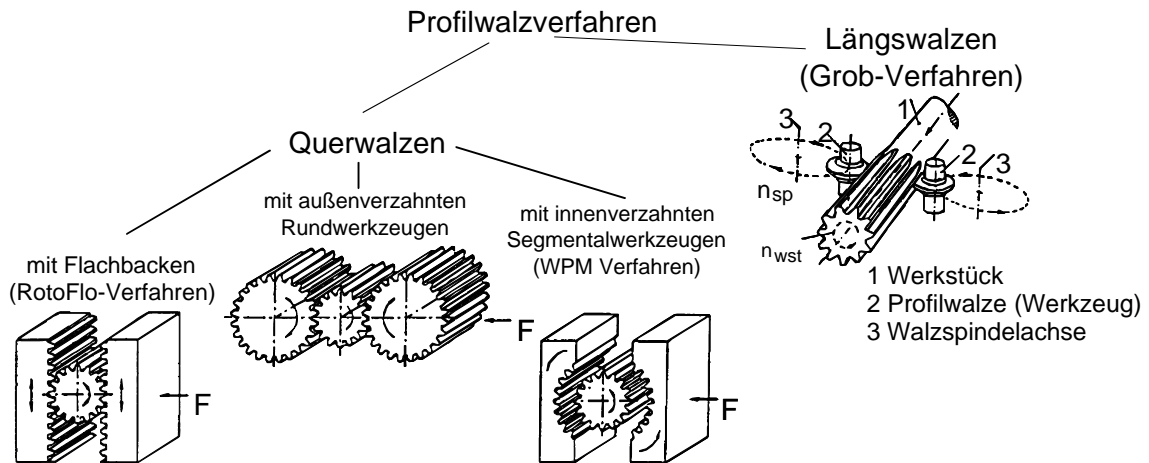
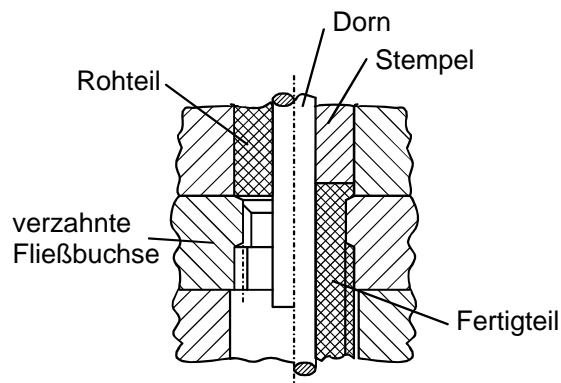


Bild 14: Walzverfahren zur Herstellung von Verzahnungen /37/

Durch Kaltwalzen lassen sich Verzahnungsqualitäten von IT 6 bis IT 7 nach DIN 3962 erreichen, wobei sich die Verzahnungsqualität durch das anschließende Härten um etwa eine Stufe verschlechtert /16/. Stirnräder mit Laufverzahnungen können durch das Walzen von langen Stangen nicht wirtschaftlich hergestellt werden, da die anschließenden spanenden Trenn- und Bohroperationen den wirtschaftlichen Vorteil der Kaltumformung eliminieren /38/.

3.3.2 Fließpressen

Das Fließpressen bietet eine weitere Möglichkeit, Verzahnungen umformtechnisch herzustellen (Bild 15). Im Bereich der Kaltumformung werden vorwiegend das Hohlvorwärtsfließpressen und das Querfließpressen eingesetzt /39/.



Hohl-Vorwärts-Fließpressen

Bild 15: Hohl-Vorwärts-Fließpressen zur Herstellung von Verzahnungen /37/

Beim Hohlvorwärtsfließpressen geradzahnter Zahnräder ist unter optimalen Bedingungen, ausgehend vom rotationssymmetrischen Rohteil, eine Verzahnungsqualität von IT 8 erreichbar /40/. Bei Schrägverzahnungen kommt es aufgrund der ungleichmäßigen Werkzeugbelastungen zu einer ungleichmäßigen Ausformung zwischen Rechts- und Linksflanke. Durch eine optimierte Einlaufzone der Matrize konnte die Verzahnungsqualität der fließgepressten Schrägverzahnungen zwar verbessert, die Qualitätsstufe IT 11 jedoch nicht unterschritten werden /40/.

Das Querfließpressen (Bild 16) findet bereits seit mehreren Jahren Anwendung zur Fertigung maß- und formgenauer Werkstücke mit quer zur Längsachse angeordneten Nebenformelementen. Durch zwei sich aufeinander zubewegende Stempel wird der Werkstoff aus der Höhe radial in die werkzeugseitig angebrachten Nebenformelemente gedrängt. Im Bereich der Verzahnungsherstellung findet das Querfließpressen industrielle Anwendung beim Herstellen von Kegelrädern durch Kaltumformen (siehe auch Abschnitt 3.2).

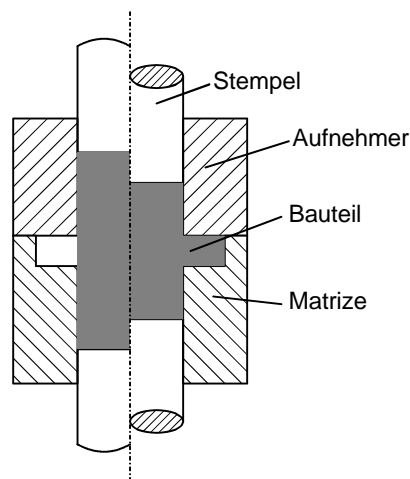


Bild 16: Prinzipdarstellung des Voll-Quer-Fließpressens

3.3.3 Präzisionsschmieden

Das Präzisionsschmieden wird industriell zur Herstellung von Fahrzeugtriebeteilen, wie Kupplungszahnrädern, Synchronringen, Teller- und Kegelrädern eingesetzt. In Bild 17 sind einige Bauteile dargestellt. Die hohen Genauigkeiten im Bereich von IT 7 – IT 9 werden in der Regel durch einen Kaltkalibriervorgang im Anschluss an die Warmumformung erzielt /7/.

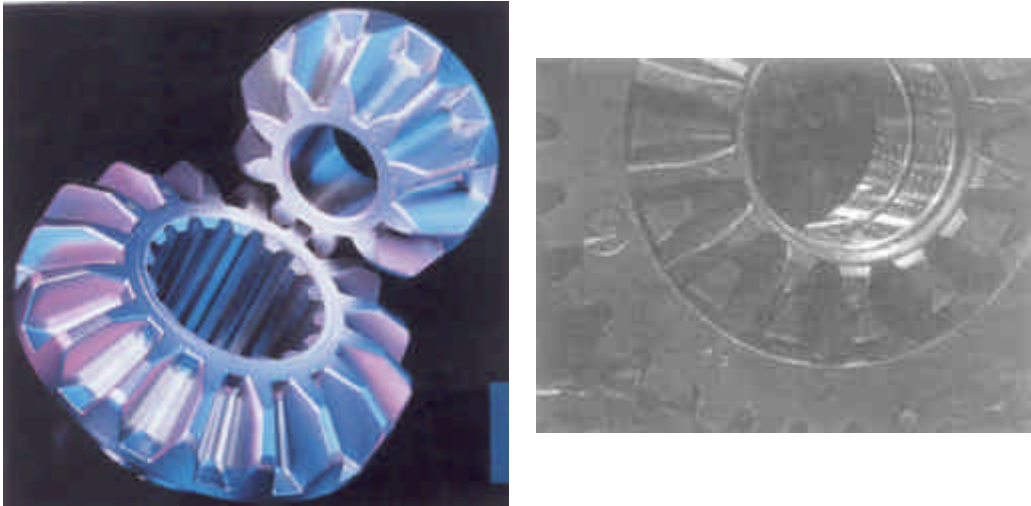


Bild 17: Im industriellen Einsatz befindliche präzisionsgeschmiedete Bauteile /14/26/

Verfahren zur Herstellung präzisionsgeschmiedeter Schrägverzahnungen durch Formstauchen werden bei /10/41/21/ vorgestellt. Mit den Werkzeugprinzipien ist eine vollständige Formfüllung der Zahnräder erzielt worden. Es wird angestrebt, durch einen einstufigen Warmumformprozess Verzahnungsgenauigkeiten zu erzielen, die lediglich eine Hartfeinbearbeitung als Endbearbeitungsschritt erfordern. Hierbei weisen die Verzahnungen lediglich ein Bearbeitungsaufmaß von ca. 0,1 mm pro Flanke auf.

Dieses Aufmaß ist durch eine anschließende Hartfeinbearbeitung abzutragen. Durch die Aufmaßdicke von 0,1 mm wird sichergestellt, dass eine wirtschaftliche spanende Bearbeitung erfolgen kann und die Zahnflanken optimal bearbeitet werden können. Dies bedeutet, dass keine Rückstände vom Schmiedeprozess, wie z. B. Zunder, auf den Flanken verbleiben.

Die Genauigkeiten, die durch die verschiedenen Umformprozesse erzielt werden können, sind in Bild 18 dargestellt /8/.

Aussagen über die exakt zu erreichende Qualität bei einer Serienfertigung von komplexen Antriebsbauteilen können bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht gemacht werden.

Umformverfahren	ISO-Toleranzen (IT) entspr. DIN ISO 286 Teil 1											
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Gesenkschmieden Schmiedegüten E und F nach DIN 7526												
Gesenkschmieden Genauschmieden												
Gesenkschmieden Präzisionsschmieden												
Kaltfließpressen												
Halbwarmfließpressen												
Warmfließpressen												
Maßprägen (kalt)												

■ mit herkömmlichen Fertigungseinrichtungen erreichbar

■ durch Sondermaßnahmen und in Ausnahmefällen erreichbar

nach IDS

Bild 18: Erreichbare Genauigkeiten der Umformung /8/

4 Statistische Versuchsplanung

Auf einen technischen Prozess wirken eine Vielzahl von Einflussgrößen. Um einen optimalen Prozesszustand durch geeignete Einstellung und Kombination der Einflussgrößen zu ermitteln, sind Experimente oft unerlässlich. Zur Minimierung des Versuchsaufwands bieten sich die Techniken der statistischen Versuchsplanung an. Häufig angewendete Methoden sind die Faktorenpläne und die Versuchsplanung nach Taguchi.

Die orthogonalen Versuchspläne nach Taguchi zeichnen sich durch ein Minimum an durchzuführenden Versuchen aus. Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen erfassen sie aber nicht. Die schematische Anwendung der Taguchi-Pläne kann zu Fehleinschätzungen hinsichtlich des vorausgesagten Prozessoptimums führen, wenn in der Realität Wechselwirkungen vorhanden sind. Deshalb muss der Experimentator durch vorherige Systemanalyse vorhandene Wechselwirkungen in den Versuchsplan einbauen.

Insbesondere bei neuen Fertigungsprozessen, aber auch bei traditionellen Fertigungsverfahren, bei denen einzelne Komponenten neu gestaltet wurden, bestehen in der Regel keine Kenntnisse bezüglich der Wechselwirkungen, so dass trotz des vorteilhaften geringen Versuchsaufwands die Anwendung der Taguchi-Pläne nicht sinnvoll ist /42/.

Wesentlich höher ist der experimentelle Aufwand bei den vollständigen Faktorplänen. Allerdings sind sie in der Lage, alle Wechselwirkungen zu

erfassen, ohne dass vor der Versuchsdurchführung deren Vorhandensein bekannt sein oder abgeschätzt werden muss.

Um die Effekte und Wechselwirkungen hinsichtlich ihrer Signifikanz analysieren zu können, werden bei allen genannten Versuchsplanungstechniken varianzanalytische Betrachtungen herangezogen, wobei eine mehrmalige Versuchswiederholung zur Bestimmung der Versuchsstreuung notwendig ist /43/.

4.1 Auswahl einer geeigneten Versuchsmethodik

Ziel der statistischen Versuchsplanung ist es, die signifikanten Einflussfaktoren auf die Qualitätsmerkmale durch gezielte Versuche zu ermitteln. Hierdurch wird der Versuchsaufwand drastisch reduziert /44/.

In der klassischen Versuchsmethodik unterscheidet man zwei Arten:

- Einfaktorieller Versuchsplan und
- Vollfaktorieller Versuchsplan.

Bei dem einfaktoriellen Versuchsplan wird je Versuchspunkt jeweils ein Einflussfaktor geändert. Hierbei lässt sich Aufschluss über den Einfluss des einzelnen Prozessparameters (Einflussfaktoren) bei dem vorherrschenden Prozess auf die Zielgrößen (Qualitätsmerkmale) gewinnen. Wechselwirkungen von zwei oder mehreren Parametern aufeinander lassen sich hierdurch jedoch nicht bestimmen /45/. Das Wissen über die Wechselwirkung von verschiedenen Parameter untereinander ist jedoch gerade bei der Warmmassivumformung notwendig, da hier verschiedene Parameter prozessbedingten Schwankungen unterliegen (z. B. Werkstücktemperatur und Rohteilgewicht).

Für die Betrachtung der Wechselwirkungen verschiedener Prozessparameter untereinander ist die vollfaktorielle Versuchsplanung anzuwenden. Hierbei werden mehrere Parameter gleichzeitig stufenweise variiert. In der Regel werden zwei Stufen verwendet, wodurch es möglich ist, Mittelwerte verschiedener Einstellungen zu bekommen und sogenannte Effekte zu berechnen /46/. Unterschieden wird zwischen Haupteffekten, die auf der Verstellung eines Faktors beruhen und Wechselwirkungseffekten, die auf die gleichzeitige Verstellung mehrerer Faktoren zurückgehen /47/. Auf grund der genannten Vorteile im Hinblick auf die Auswertung der Versuche wurde der vollfaktoriellen Versuchsmethodik für die anschließenden Untersuchungen gewählt.

4.2 Vorgehensweise bei den Untersuchungen

Die Vorgehensweise bei der Verwendung eines vollfaktoriellen Versuchsplans gliedert sich in vier Phasen:

- Einflussfaktorenanalyse,
- Versuchsplanung,
- Durchführung der Versuche und
- abschließende Auswertung der Versuche.

Bei der **Einflussfaktorenanalyse** wird im Vorfeld der Untersuchungen festgelegt welche Prozessparameter in welchen Stufen variiert werden sollen. Hierbei wird auf Erfahrungen von vorangegangenen Untersuchungen ähnlicher Prozesse aufgebaut. Die Stufen sollten hierbei den Forderungen nach technischer Sinnfälligkeit und ausreichender Änderung der Prozessparameter im Hinblick auf die Ermittlung eines Einflusses angepasst werden.

Bei der **Aufstellung des Versuchsplans** sollten Informationen genutzt werden, ob neben den Haupteffekten einzelner Prozessparameter zusätzlich Wechselwirkungseffekte zwischen den Parametern bestehen. Diese Wechselwirkungen zwischen den Parametern werden durch Einsatz eines vollfaktoriellen Versuchsplans berücksichtigt /48/.

Bei **Durchführung der Versuche** nach dem vollfaktoriellen Versuchsplan kann der Versuchsaufwand sehr komplexe Dimensionen annehmen. Beträgt die Anzahl der zu untersuchenden Faktoren k , so müssen bei n Variationsstufen der Faktoren pro Versuchsreihe n^k Versuche durchgeführt werden /48/.

Durch die sehr schnell ansteigende Zahl der durchzuführenden Versuche, ist im Vorfeld eine sorgfältige Auswahl der zu untersuchenden Prozessparameter notwendig. Hierbei ist auf die durchgeführte Einflussfaktorenanalyse zurückzugreifen. Die Variation der Prozessparameter in zwei Stufen (hoch, niedrig bzw. +, -) führt zu einer Versuchszahl von 2^k .

Für drei Prozessparameter (A, B, C) ergibt sich somit eine Versuchszahl von:

$$v = n^k \hat{=} 2^3 = 8 \quad \text{Gleichung 1}$$

v	:	Versuchszahl
n	:	Anzahl der Parameterstufen
k	:	Anzahl der Parameter

In der Planmatrix werden nun die einzelnen Versuche mit den dazugehörigen Einstellungen (Stufen) der Prozessparameter festgehalten. Die Bezeichnung der Stufen kann unterschiedlich erfolgen (z. B. + und -), aus Gründen der rechnergestützten Auswertung, bietet sich jedoch die Festlegung in

- Hohe Stufe = (+1),
- niedrige Stufe = (-1).

an. In Bild 19 ist dies graphisch dargestellt.

Durch die Anwendung der statistischen Versuchsplanung lassen sich die Ursachen für Streuungen in der Fertigungsqualität systematisch erfassen und in eine Prozessparametervorgabe für den Serienbetrieb umsetzen.

		Prozessparameter [k]			Qualitätsgröße
		A	B	C	y
Versuchszahl [v]	1	+1	+1	+1	...
	2	+1	+1	-1	...
	3	+1	-1	+1	...
	4	+1	-1	-1	...
	5	-1	+1	+1	...
	6	-1	+1	-1	...
	7	-1	-1	+1	...
	8	-1	-1	-1	...

Bild 19: Darstellung eines 2³-Versuchsplanes

Die Auswertung der Versuche erfolgt durch die Ermittlung der Haupteffekte und Wechselwirkungseffekte sowie der Durchführung der Varianzanalyse und des Signifikanztests (siehe Abschnitt 4.3 und 4.4).

4.3 Haupteffekte und Wechselwirkungseffekte

Durch die Abarbeitung des Versuchsplans werden die Haupteffekte und Wechselwirkungseffekte ermittelt /46/.

Der Haupteffekt ist dabei definiert als die mittlere Änderung der Zielgröße bei einem Wechsel der Einstellung (Stufe) eines Parameters. So lässt sich der Haupteffekt ermitteln aus der Differenz des Mittelwerts aller Ergebnisse bei hoher Parametereinstellung (+1) und des Mittelwerts aller Ergebnisse bei niedriger Parametereinstellung (-1).

$$\text{Haupteffekt A} = 2 \cdot \frac{\sum y(A+) - \sum y(A-)}{v} \quad \text{Gleichung 2}$$

- A : Parameter
- y : Zielgröße bzw. Qualitätsfaktor
- v : Versuchszahl

Die Wechselwirkungseffekte zwischen zwei Faktoren ergibt sich aus der Beeinflussung der Zielgröße durch beide Faktoren. Man ermittelt z. B. den Effekt von Parameter A sowohl auf der oberen als auch auf der unteren Einstellung von Parameter B. Als Maß für die Wechselwirkung AB ist die Differenz der beiden Effekte definiert.

$$\text{Wechselwirkungseffekt AB} = 2 \cdot \left(\frac{\sum y(A+) - \sum y(A-)}{v} \right)_{B+} - 2 \cdot \left(\frac{\sum y(A+) - \sum y(A-)}{v} \right)_{B-} \quad \text{Gleichung 3}$$

- A, B : Parameter
- y : Zielgröße bzw. Qualitätsfaktor
- v : Versuchszahl

4.4 Varianzanalyse und Signifikanztest bei 2^k-Versuchsplänen

Die Aufgabe der Varianzanalyse besteht darin, die Signifikanz verschiedener Faktoren zu bestimmen, d. h. festzustellen, ob ein Faktor auf einen zufälligen

Einfluss zurückzuführen ist oder mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit einen Einfluss auf das Versuchsergebnis besitzt /48/. Die sogenannte Zufallsvariabilität ist die Folge unkontrollierbarer Unterschiede bei der Versuchsdurchführung. Die Varianz ist als Summe der quadratischen Abweichungen der Messwerte von einem Mittelwert definiert.

Der Ablauf der Varianzanalyse gliedert sich in drei Abschnitte:

- Ermittlung der Varianzkomponenten
- Ermittlung der Versuchsstreuung
- Signifikanztest

Diese werden im Weiteren näher erläutert.

4.4.1 Ermittlung der Varianzkomponenten

Der Varianzanalyse liegt ein lineares Modell zugrunde, das anhand eines Versuchsplanes mit den Parametern A und B erläutert werden soll. Die Faktoren A und B werden in n Stufen variiert, wobei jeder Versuch c-mal ausgeführt wird.

Faktor A: 1...i...n Stufen
 Faktor B: 1...j...n Stufen
 1,2...m...c Realisierungen

Beim linearen Modell wird ein Stichprobenwert in die Komponenten Mittelwertanteil, einen Anteil, der den Einfluss der Parameter A und B beschreibt, einen Wechselwirkungsanteil AB und einen Streuungsanteil zerlegt /48/.

$$y_{ijm} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijm} \quad \text{Gleichung 4}$$

y_{ijm} : beobachteter Wert
 μ : wahrer Mittelwert aller Versuche
 α_i : Beitrag von A auf der i-ten Stufe (Haupteffekt von A)
 β_j : Beitrag von B auf der j-ten Stufe (Haupteffekt von B)
 $(\alpha\beta)_{ij}$: Abweichung von der Additivität bezüglich
 $\mu + \alpha_i + \beta_j$ (Wechselwirkungseffekt AB)
 ε_{ijm} : Versuchsstreuung

Bei einem 2^3 -Versuchsplan sind neben den Haupteffekten der Parameter A, B und C, die drei Wechselwirkungseffekte AB, AC, BC sowie der Dreifach-Wechselwirkungseffekt ABC zu berücksichtigen; d. h. es ergeben sich sieben Varianzanteile.

Die Varianzanalyse führt über die Berechnung der Summe der Quadrate der Abweichungen „SQ“ einer Zufallsstichprobe mit $i = 1 \dots c$ Einzelwerten:

$$SQ = c \cdot 2^{k-2} \cdot \text{Effekt}^2 \quad \text{Gleichung 5}$$

SQ	:	Summe der Quadrate der Abweichungen
c	:	Anzahl der Wiederholungen am Versuchspunkt
k	:	Anzahl der Faktoren des Versuchsplans

Die mittlere Quadratsumme „MQ“ ist der Quotient aus der Summe der Quadrate der Abweichungen „SQ“ und der Anzahl der Freiheitsgrade „FG“ des Faktors. Der Freiheitsgrad ergibt sich aus der Anzahl der Stufen des Faktors vermindert um eins.

Bei einer Variation des Faktors in zwei Stufen ist der Freiheitsgrad des Faktors gleich eins (FG = k-1=1):

$$MQ = \frac{SQ}{FG} \quad \text{Gleichung 6}$$

MQ	:	Mittlere Quadratsumme
SQ	:	Summe der Quadrate der Abweichungen
FG	:	Anzahl der Freiheitsgrade FG = k-1

Die Werte „SQ“, „MQ“ werden für alle Variationsquellen (A, B, C, AB usw.) berechnet.

4.4.2 Ermittlung der Versuchsstreuung

Die Versuchsstreuung quantifiziert die zufälligen Einflüsse, die auf die Messgröße wirken. Enthält ein faktorieller Versuchsplan $i = 1 \dots N$ Versuchspunkte und werden diese Versuchspunkte $j = 1 \dots c_i$ -mal wiederholt, dann wird der Mittelwert am i -ten Versuchspunkt (Zeilenmittelwert) aus den einzelnen Messwerten y_{ij} gebildet:

$$\bar{y}_i = \frac{1}{c_i} \sum_{j=1}^{c_i} y_{ij} \quad \text{Gleichung 7}$$

\bar{y}_i	:	Mittelwert von y am i -ten Versuchspunkt (Zeilenmittelwert)
y_{im}	:	Messwert am i -ten Versuchspunkt bei m -ter Wiederholung
c_i	:	Anzahl der Wiederholungen am Versuchspunkt i

Die Gesamtzahl der Versuche beträgt demnach

$$w = c \cdot v \quad \text{Gleichung 8}$$

bzw.

$$w = \sum_{i=1}^v c_i \quad \text{Gleichung 9}$$

w	:	Gesamtanzahl der Versuche
v	:	Anzahl der Versuchspunkte
c	:	Anzahl der Wiederholungen am Versuchspunkt

Wird die Versuchsstreuung wie im vorliegenden Fall aus Mehrfachrealisierungen an den Versuchspunkten berechnet, wird der Mittelwert über alle Gruppen gebildet. Damit ergeben sich die Mittelwerte der Zeilenvarianzen zu:

$$\bar{s}_i^2 = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^v s_i^2 \quad \text{Gleichung 10}$$

mit
$$s_i^2 = \frac{1}{c_i - 1} \sum_{m=1}^{c_i} (y_{im} - \bar{y}_i)^2 \quad \text{Gleichung 11}$$

\bar{s}_i^2	:	Versuchsstreuung (mittlere gewichtete Streuung)
s_i^2	:	Zeilenvarianz (Streuung am i-ten Versuchspunkt)
\bar{y}_i	:	Mittelwert von y am i-ten Versuchspunkt
y_{im}	:	Messwert am i-ten Versuchspunkt
c_i	:	Anzahl der Wiederholungen am Versuchspunkt i
v	:	Anzahl der Versuchspunkte

4.4.3 Signifikanztest

Beim Signifikanztest werden die mittleren Quadratsummen „MQ“ der Variationsquellen und die Versuchsstreuung s_i^2 mit Hilfe des F-Tests verglichen. Dabei wird eine F-Testgröße aus den beiden Stichprobenvarianzen s_1^2 und s_2^2 mit den dazugehörigen Freiheitsgraden v_1 und v_2 ermittelt.

$$F = \frac{s_1^2}{s_2^2} ; \left[s_1^2 > s_2^2 \right] \quad \text{Gleichung 12}$$

F	:	Testgröße
s_1^2, s_2^2	:	Stichprobenvarianzen

s_1^2 entspricht der Varianz „MQ“ der zu prüfenden Variationsquelle, hierfür ist der Freiheitsgrad $FG = 1$. Die Versuchsstreuung bildet als s_2^2 den Nenner in der Testgröße $F = s_1^2/s_2^2$ mit dem Freiheitsgrad $FG_2 = v (c-1)$.

Ein Effekt kann entsprechend dieses Niveaus als signifikant ($\alpha = 5\%$, Sicherheitswahrscheinlichkeit $P = 95\%$) oder als hochsignifikant ($\alpha = 1\%$, Sicherheitswahrscheinlichkeit $P = 99\%$) eingestuft werden. Der Wert $F = F(FG, FG_2, P)$ kann aus entsprechenden Tabellen z. B. /47/ oder /48/ entnommen werden. Er ist von der Anzahl der Freiheitsgrade FG und FG_2 , auf deren Basis die Versuchsstreuung ermittelt wurde und von der Höhe des gewählten Signifikanzniveaus α abhängig.

Generell ist zu beachten, dass die Signifikanz eine mathematisch statistische Größe ist. Insbesondere bei einer nur geringfügigen Überschreitung der $\alpha = 5\%$ Signifikanzgrenze sollten die Effekte einer Plausibilitätskontrolle

unterzogen werden. Ebenso können statistisch signifikante Effekte technisch bedeutungslos sein.

5 Untersuchungen zum Formfüllungsverhalten beim Präzisionsschmieden von Verzahnungen

In diesem Abschnitt sollen Untersuchungen zum Präzisionsschmieden von Verzahnungen durchgeführt werden, deren Ergebnisse Konstrukteuren von ähnlich gestalteten Bauteilen bereits während der Konzeption neuer Bauteile Richtwerte für die Prozessauslegung liefern.

Für die exakte Auslegung von Präzisionsschmiedevorgängen ist eine genaue Kenntnis über das Prozessverhalten unabdingbar. Prozessanalysen beim Präzisionsschmieden von Zahnrädern wurden für einzelne Geometrien von /6/10/11/ durchgeführt. Bei diesen Untersuchungen wurden unterschiedliche Zahnradgeometrien behandelt, die sich durch ihre Verzahnungsdaten (Modul, Zähnezah, Eingriffs- und Schrägungswinkel) stark unterscheiden und so eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Geometrien erschweren. Innerhalb dieser Arbeit soll daher eine Verzahnungsgeometrie untersucht werden, die vergleichende Aussagen zum Präzisionsschmieden von unterschiedlichen Zahngeometrien zulässt. Hierzu wurde eine Geometrie erzeugt, bei der Zähne mit unterschiedlichen Verzahnungsdaten an einem Zahnrad vorliegen (Bild 20).

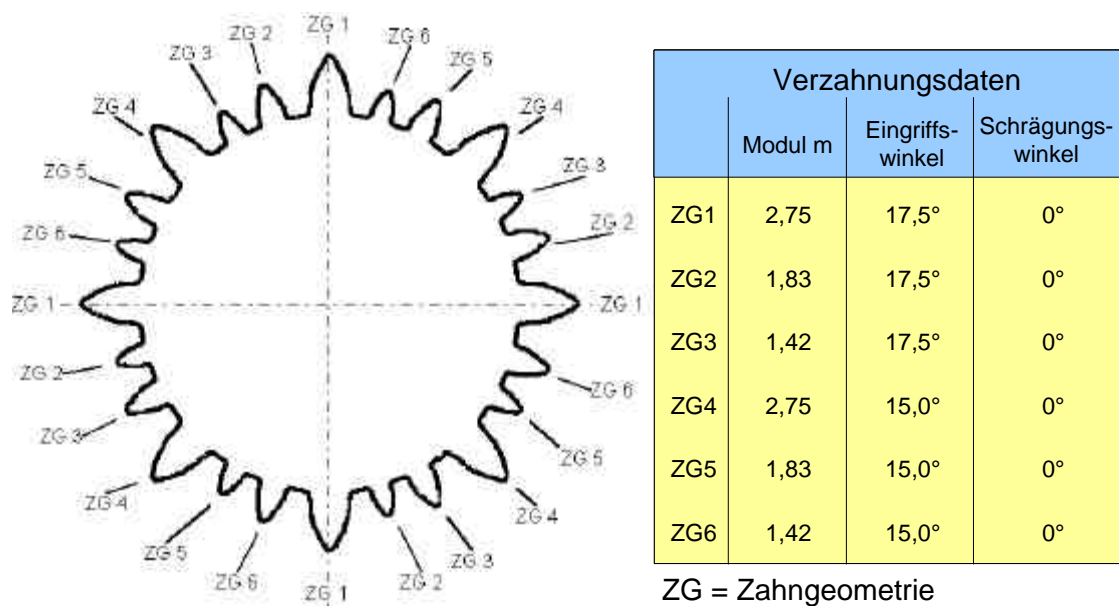


Bild 20: Verzahnungsdaten und Anordnung der Zahngeometrien in der Matrize

Die verwendete Matrize weist sechs verschiedene Zahngeometrien auf dem Umfang auf, die sich in Modul m und Eingriffswinkel α_n unterscheiden. Bei den Verzahnungen werden drei Module mit zwei Eingriffswinkeln untersucht. Hieraus sollen Aussagen über die Beeinflussung der Formfüllung in Abhängigkeit von den bestimmenden Verzahnungsgrößen gewonnen werden.

Die Anordnung der Zahngeometrien, die bei der Umformung in den Bauteilen abgeformt werden, ist so gewählt, dass sich auf dem Umfang gleichartige Belastungen ausbilden. Hierfür wurden die sechs einzelnen Zahngeometrien auf einem Viertelkreis angeordnet und um jeweils 90° um den Mittelpunkt gedreht, so dass eine vollständige, verzahnte Kontur auf dem Umfang entsteht.

Diese Art der Anordnung wurde aus folgenden Gründen gewählt:

1. Durch die Anordnung der Geometrieelemente des Bauteils kann die Beeinflussung der Formfüllung durch nicht zentrisches Einlegen bei der Messung der Geometrie kompensiert werden (gleiche Zahngeometrien um jeweils 90° , 180° und 270° gedreht). Dies geschieht durch die Definition der Formfüllung über zwei gleiche, jeweils gegenüberliegende, Zahngeometrien. Zum Abgleich werden die um 90° gedrehten Verzahnungsgeometrien herangezogen.
2. Die exakte Vergleichbarkeit des Formfüllungsverhaltens verschiedener Zahngeometrien in Abhängigkeit der während der Umformung herrschenden Spannungen ist bei der hier gewählten Vorgehensweise gewährleistet. Die Messungen unterschiedlicher Zahngeometrien werden an einem Bauteil vorgenommen. Es wird erreicht, dass bei der Umformung exakt gleiche Randbedingungen (Temperatur, Stößelgeschwindigkeit, Umformkraft) vorliegen.
3. Ein weiterer Vorteil dieser Art der Anordnung ist die Reduzierung des Versuchsprogramms. Die sechs Geometrien der unterschiedlichen Verzahnungen können durch nur eine Matrizengeometrie untersucht und ausgewertet werden.

Da unterschiedliche Zahngeometrien nebeneinander liegen, kann kein absoluter Wert für die Formfüllung ermittelt werden. Es werden qualitative Aussagen über die Ausbildung der Geometrien gewonnen. Diese qualitative Betrachtung ist für die Bewertung der Herstellbarkeit ausreichend, da bei jeder Fertigung von Bauteilen Einflüsse durch Maschinen oder andere Faktoren, wie z. B. unterschiedliche Werkstoffchargen, hinzukommen, die das Ergebnis der Umformung beeinträchtigen können.

Das Formfüllungsverhalten von komplexen, verzahnten Geometrien wird durch unterschiedliche Parameter beeinflusst. Ein entscheidender Parameter ist die örtlich zu überwindende Fließspannung k_f , die vom Umformgrad j , von der Umformgeschwindigkeit \dot{j} , der Umformtemperatur T_{um} und dem verwendeten Werkstückwerkstoff abhängig ist /56/.

Neben dem Wissen über die optimalen Prozessparameter, wie z. B. Umformtemperatur und Stößelgeschwindigkeit zur Erreichung der geforderten Bauteilqualität, ist die Kenntnis über die sich damit einstellende Formfüllung in Verbindung mit der Ausgangsgeometrie ausschlaggebend.

Durch das Fließverhalten und die sich daraus einstellende Formfüllung wird die Belastung des Werkzeuges im Hinblick auf thermische und mechanische Beanspruchung maßgeblich beeinflusst.

Dieses Verhalten hat beim Schmieden direkten Einfluss auf die lokalen Druckberührzeiten von Werkstück und Werkzeug. Des Weiteren kann durch die Kenntnis der Formfüllung zu bestimmten Zeitpunkten der Umformung in Verbindung mit dem Wert der Umformkraft Aufschluss über die mechanische Belastung des Werkzeugs gewonnen werden.

Die Kenntnis des Formfüllungsverhaltens und damit die Kenntnis des Werkstoffflusses bei der Umformung ist für die Auslegung von Präzisionsschmiedebauteilen von grundlegender Bedeutung und hat einen unmittelbaren Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Fertigung. Bei der Neugestaltung von Bauteilen kann der Konstrukteur durch Kenntnis der durch einen wirtschaftlichen Präzisionsschmiedeprozess herstellbaren Geometrie maßgeblichen Einfluss auf die kostengünstige Herstellung von neu zu gestaltenden Bauteilen nehmen.

Ein immer häufiger eingesetztes Hilfsmittel zur Auslegung von Präzisionsschmiedeprozessen ist die Simulation mit Hilfe der Finiten-Element-Methode. Hierfür müssen jedoch die Randbedingungen exakt bekannt sein. Hierzu zählen die Prozessparameter wie Rohteiltemperatur, Rohteilgeometrie, Werkstoffkennwerte (Fließkurve) sowie die Stößelgeschwindigkeit oder Werkzeugkinematik. Im Anschluss an die Auslegung des Umformprozesses durch die FEM werden Versuche durchgeführt. Dies dient zur Erfassung der im Realprozess auftretenden Effekte und Wechselwirkungen bei Variation unterschiedlicher Prozessparameter.

Für die Untersuchungen der Formfüllung von Verzahnungen wurde ein Werkzeugsystem entwickelt (Bild 21), mit dem in einfachen, reproduzierbaren Versuchen Aussagen über das Formfüllungsverhalten in Abhängigkeit der aufbrachten Umformkraft gewonnen werden können.

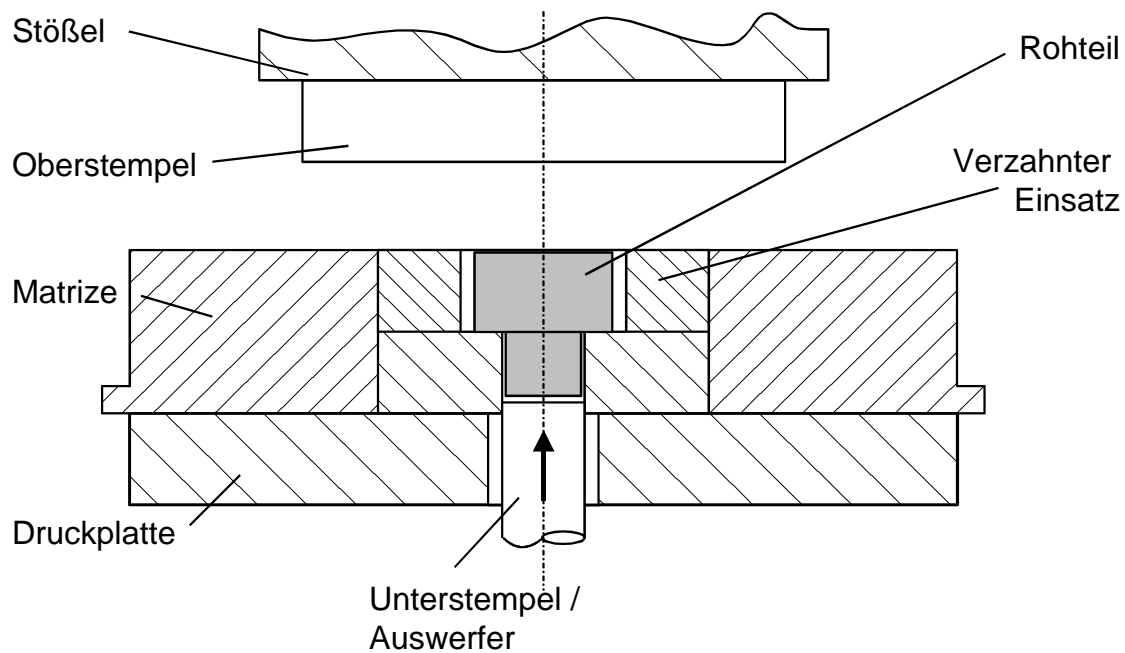


Bild 21: Werkzeugsystem zur Untersuchung des Formfüllungsverhaltens verzahnter Bauteile

5.1 Verifizierung der Konstruktion mit Hilfe der Finiten - Element - Methode

Mit Hilfe der Finite - Elemente - Methode ist es möglich, Umformprozesse im Vorfeld der praktischen Versuche rechnerisch auszulegen /25/49/50/51/52/57/. Durch die Analyse des Umformprozesses mit verschiedenen Randparametern kann eine genaue Aussage über das Verhalten des Realprozesses getroffen werden, um die Konstruktion im Vorfeld der Untersuchungen zu überprüfen.

Die Verifizierung der Simulationsergebnisse durch den Abgleich mit dem Realprozess ist für die Berechnungen nachfolgender Prozesse äußerst wichtig. Hierdurch wird die Genauigkeit der Simulation verbessert, da durch den Abgleich zwischen Berechnung und Realprozess die Eingabewerte in das FEM-Paket verifiziert werden können.

Die FE-Simulation des Umformprozesses der Versuchsgeometrie wurde im Vorfeld der Versuche durchgeführt. Hierdurch sollte das grundsätzliche Formfüllungsverhalten der Geometrie in Abhängigkeit des geplanten Versuchsaufbaus untersucht werden, um den Aufwand der praktischen Versuche zu minimieren. Hierfür wurde ein Simulationsmodell erstellt, welches die einzelnen Werkzeugkomponenten abbildet (Bild 22). Als Randbedingungen für die Simulation wurden die anlagenspezifischen Größen gewählt, die in Tabelle 4, Seite 32, dargestellt sind.

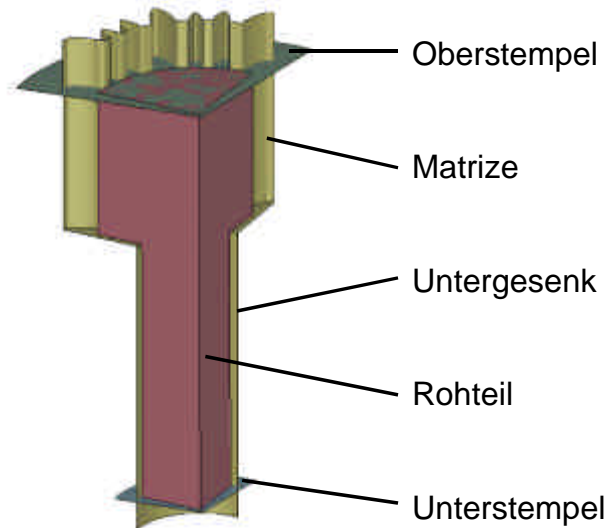


Bild 22: Aufbau des Simulationsmodells

Anhand der Simulationsergebnisse wurde festgestellt, dass das gewählte Werkzeugkonzept zu einem guten Umformergebnis führt. Die Simulation gibt über den zeitlichen Verlauf der Formfüllung in Abhängigkeit der unterschiedlichen Zahngeometrien Aufschluss. Auch wurde nachgewiesen, dass der notwendige Kraftbedarf mit der zur Verfügung stehenden Presse aufgebracht werden kann. Die Formfüllung der Geometrie zu verschiedenen Zeitpunkten ist in **Bild 23** zu sehen.

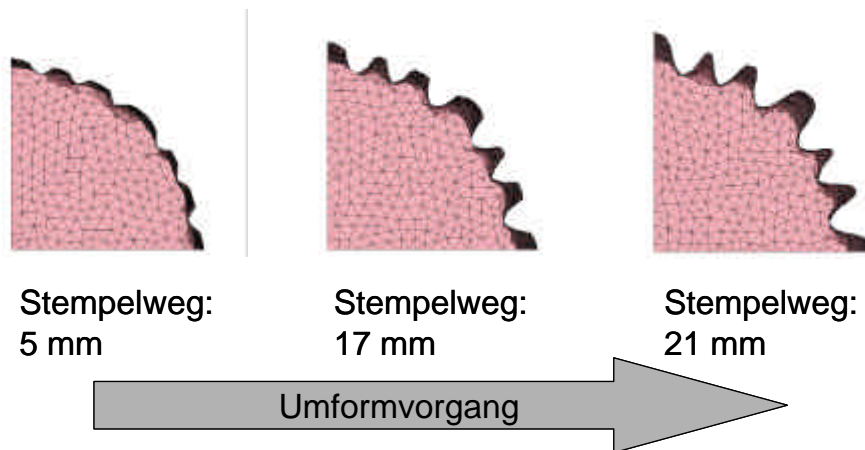


Bild 23: Simulation der Formfüllung

Ein Vorteil der Simulation ist, dass Aufschlüsse über das Werkstoffverhalten im Inneren des Bauteils gewonnen werden können, die messtechnisch nicht oder nur schwer zu erfassen sind. Hierzu zählen die Spannungs- und Temperaturverteilung innerhalb des Bauteils, die direkten Einfluss auf die Werkzeugbelastung während der Umformung haben. Die FEM-Berechnung der mechanischen und thermischen Belastungen des Werkzeugsystems wiesen hierbei keine Anzeichen einer überhöhten Anforderung an das Werkzeug auf.

5.2 Versuchsaufbau

Für die Versuche wird eine hydraulische Presse der Firma AP&T (Bild 24) mit einer Nennkraft von 4000 kN genutzt. Diese Kraft kann durch den Stößel der Maschine aufgebracht werden.

Für die Durchführung der Versuche wird auf eine Besonderheit der Presse zurückgegriffen. Die Presse verfügt im Pressentisch sowie im Stößel über Hydraulikzylinder, die Kräfte bis zu 500 kN bei Geschwindigkeiten von bis zu 2000 mm/s aufbringen können. Diese Zylinder können über die Steuerung der Presse (Sinumerik 840D ®) angesteuert werden. Durch die Verwendung dieser Zylinder können Stößelgeschwindigkeiten erzielt werden, die beim Präzisionsschmieden auf weggebundenen Umformmaschinen üblich sind und im Bereich von 200 mm/s bis 600 mm/s liegen.

Ziehstößel

Presskraft	4000 kN	
Rücklaufkraft	325 kN	
Hublänge	1000 mm	
Schließgeschwindigkeit	400 mm/s	
Max. Ziehgeschwindigkeit	bis 1100 kN	45 mm/s
Ziehgeschwindigkeit	bei 2000 kN	25 mm/s
Ziehgeschwindigkeit	bei 4000 kN	12 mm/s
Max. Rücklaufgeschwindigkeit	230 mm/s	

Umformstempel

(jeweils im oberen und unteren Pressentisch)		
Max. Presskraft	500 kN	
Max. Pressgeschwindigkeit	2000 mm/s	

Auswerferstempel

(jeweils im oberen und unteren Umformstempel)		
Max. Presskraft	50 kN	
Max. Pressgeschwindigkeit	400 mm/s	



**Hydraulische Presse AP&T
LPS-4000-13-10**

Bild 24: Kenndaten der hydraulischen Presse der Fa. AP&T

Die Presse besitzt integrierte Weg- und Druckaufnehmer, über die zu jeder Zeit Daten über die Umformung zur Verfügung stehen. Aus diesen Daten lässt sich der Umformkraft-Stempelweg-Verlauf darstellen.

Durch die Steuerung der Presse ist es möglich, verschiedene Kriterien zur Beendigung der Versuche zuzulassen. Zum Einen kann die Maschine weggesteuert gefahren werden. Dies bedeutet, dass ein vorgegebener Stempelweg-Zeit-Verlauf von der Maschine realisiert wird. Zum Anderen gibt es die Möglichkeit, den Stößel kraftgesteuert zu verfahren. Hierbei bringt der Stößel nur die jeweils gewünschte Kraft auf, die für die Umformung zur Verfügung gestellt werden soll.

Durch den einfachen Aufbau des Werkzeugsystems (Bild 21) ist eine hohe Wiederholgenauigkeit gewährleistet, da beeinflussende Faktoren aus einer komplexen Kinematik des Werkzeugsystems entfallen. Durch die Verwendung

der oben beschriebenen Presse ist es möglich, das Werkzeugsystem ohne Entkopplungselemente, die beim Präzisionsschmieden die notwendige Trennung der Schritte „Gesenk schließen“ und „Umformen“ realisieren, zu verwenden. Diese Funktion wird durch die beiden getrennt ansteuerbaren Hydraulikzylinder übernommen.

Als Werkzeugkomponenten kommen zum Einsatz:

- Verzahnte Matrize,
- Oberstempel,
- Unterstempel (gleichzeitig Auswerfer) sowie
- Adapterplatten zur Anpassung an den Presseneinbauraum.

Der Oberstempel dient hierbei lediglich zum Schließen des Werkzeugsystems und ist am oberen Hydraulikzylinder befestigt. Über den Unterstempel wird die aus dem unteren Hydraulikzylinder bereitgestellte Kraft für die Umformung in das Rohteil eingeleitet. In der verzahnten Matrize wird die Verzahnung des Bauteils abgebildet.

5.3 Durchführung der Versuche

5.3.1 Versuchsplanung

Für eine exakte Bestimmung der Einflüsse der einzelnen Parameter auf das Umformergebnis wurden die Untersuchungen gemäß der statistischen Versuchsplanung (Abschnitt 4) durchgeführt. Ausgewählt wurde hierbei ein vollfaktorieller Versuchsplan mit folgenden Parametervariationen:

- Werkstücktemperatur 1240 °C; 1270 °C
- Stößelgeschwindigkeit 250 mm/s; 500 mm/s
- Stempelweg 208 mm; 220 mm; 227 mm; 230 mm

Als Werkstoff wurde 16MnCr5 verwendet. Eine Variation des Schmierstoffs wird nicht vorgenommen. Zum Einsatz kommt der Schmierstoff Deltaforge F31 der Firma Acheson, der sich in zahlreichen Präzisionsschmiedeversuchen als empfehlenswert herausgestellt hat.

Die Werkzeuge werden nicht vorgeheizt. Die zeitliche Abfolge der Versuche wird durch die manuelle Erwärmung der Proben vorgegeben. Alle zehn Minuten wird ein Bauteil gefertigt. In der Zwischenzeit kühlt das Werkzeug auf Raumtemperatur ab.

Aus der Kombination der verschiedenen Versuchseinstellungen ergibt sich ein Versuchsplan mit 16 Versuchspunkten (Tabelle 4), die mit jeweils fünf Wiederholungen statistisch abgesichert werden. Mittels der aus den Versuchen gewonnenen Daten ist es möglich, das grundsätzliche Formfüllungsverhalten in Abhängigkeit der Parameter und Zahngeometrie zu beschreiben.

Tabelle 4: Versuchsplan

Versuchspunkt	Werkstück-temperatur	Stößel-geschwindigkeit	Stempelweg
1	1240 °C	250 mm/s	208 mm
2	1240 °C	500 mm/s	220 mm
3	1270 °C	250 mm/s	227 mm
4	1270 °C	500 mm/s	230 mm
5	1240 °C	250 mm/s	208 mm
6	1240 °C	500 mm/s	220 mm
7	1270 °C	250 mm/s	227 mm
8	1270 °C	500 mm/s	230 mm
9	1240 °C	250 mm/s	208 mm
10	1240 °C	500 mm/s	220 mm
11	1270 °C	250 mm/s	227 mm
12	1270 °C	500 mm/s	230 mm
13	1240 °C	250 mm/s	208 mm
14	1240 °C	500 mm/s	220 mm
15	1270 °C	250 mm/s	227 mm
16	1270 °C	500 mm/s	230 mm

5.3.2 Schmiedeversuche

Zur Ermittlung des Formfüllungsverhaltens von verzahnten Geometrien wird eine weggebundene Steuerung eingesetzt. Die Stößelkinematik wird vorgegeben. Als Abbruchkriterium der Umformung wird der vom Stempel zurückgelegte Weg verwendet. Durch die Messung der ausgeformten Bauteilgeometrien und die Erfassung der Messwerte während der Versuche ist es möglich, einen Zusammenhang zwischen der benötigten Umformkraft, der vorherrschenden Spannung und der ausgebildeten Geometrie herzustellen.

Nach dem Einlegen des Rohteils wird das Gesenk durch den Oberstempel geschlossen. Im direkten Anschluss daran wird die Umformung durch den nach oben fahrenden Unterstempel eingeleitet. Bei Erreichung des Umformwegs wird die Umformung beendet, und der Unterstempel wird entlastet. Der Oberstempel öffnet das Gesenk und das Bauteil wird durch den Unterstempel ausgestoßen.

Im direkten Anschluss an den Umformprozess werden die Bauteile unter Sauerstoffabschluss langsam abgekühlt. Nach dem Abkühlen werden die Geometriedaten erfasst.

5.4 Auswertung der Versuche

Zur Auswertung der Versuche werden unterschiedliche Geometriemaße herangezogen. Diese werden mit den Prozessparametern aus den Versuchen korreliert. Hierdurch lassen sich die Einflüsse und Wechselwirkungen der verschiedenen Prozessparameter auf das Umformergebnis ableiten.

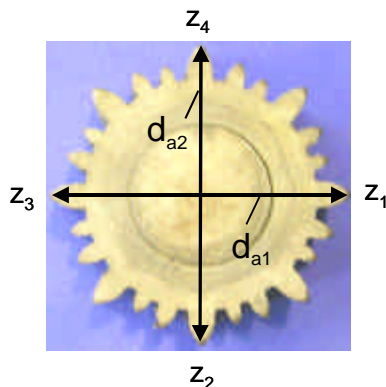
5.4.1 Definition relevanter Bauteilmaße

Das Ziel ist es, durch Präzisionsschmieden Verzahnungen endkonturnah herzustellen, so dass diese im Anschluss an eine Wärmebehandlung lediglich durch eine Hartfeinbearbeitung (Schleifen, Hartdrehen, u. a.) nachbearbeitet werden müssen, um einbaufertig vorzuliegen. Hierfür ist es notwendig, die eng tolerierten Funktionsflächen exakt abzuformen. Verzahnungen weisen eine Vielzahl von relevanten Toleranzen auf. Die überwiegende Zahl von ihnen wird durch den Hartfeinbearbeitungsprozess erreicht. Hierfür ist es jedoch notwendig, dass die durch Präzisionsschmieden hergestellte Form dies zulässt. Beim Präzisionsschmieden von Verzahnungen fließt das Material gleich dem Fließpressvorgang in die Zähne. Das Material legt sich in dem Bereich, der die Zahnflanken abbildet, an die Matrize an. Der Zahnkopfbereich wird als letztes ausgeformt. Aus diesem Grund werden für die Bewertung des Umformergebnisses zwei Bauteilmaße aus dem Bereich der Zahnkopfausformung gewählt. Diese sind:

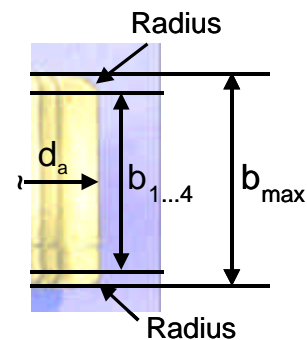
- Ausgeformter Kopfkreisdurchmesser d_a und
- ausgeformte Zahnbreite b .

In Bild 25 sind diese Maße am Bauteil dargestellt.

Ermittelter Kopfkreisdurchmesser, $d_{a,ges}$



Resultierende Zahnbreite, b_{ges}



$$d_{a,ges} = \frac{1}{n_1 + n_2} \left(\sum_{i=1..n_1} d_{a1,i} + \sum_{i=1..n_2} d_{a2,i} \right) \quad b_{ges} = \frac{1}{4 \cdot n} \left(\sum_{i=1..n} b_{1,i} + \sum_{i=1..n} b_{2,i} + \sum_{i=1..n} b_{3,i} + \sum_{i=1..n} b_{4,i} \right)$$

Maximaler Kopfkreisdurchmesser: 57,75 mm Maximale Zahnbreite, $b_{max} = 30$ mm

Bild 25: Relevante Bauteilmaße

5.4.2 Geometrieerfassung

Gemessen werden die Kopfkreisdurchmesser der einzelnen Verzahnungen der Versuchsbauweise sowie die ausgeformte Zahnbreite der einzelnen Zähne.

Bei der Messung der Kopfkreisdurchmesser wird ausgenutzt, dass gleichartige Zähne jeweils um 90° , 180° und 270° gedreht auf dem Umfang der Versuchsgeometrie angeordnet sind. Es ergibt sich die Möglichkeit, die sich einstellenden Kopfkreisdurchmesser je Versuchspunkt unabhängig von

äußeren Störgrößen, z. B. außermittige Einlegeposition, zu bestimmen. Hieraus folgt bei mehrmaliger Messung der Kopfkreisdurchmesser folgende Gleichung:

$$d_{a,ges} = \frac{1}{n_1 + n_2} \left(\sum_{i=1..n_1} d_{a1,i} + \sum_{i=1..n_2} d_{a2,i} \right) \quad \text{Gleichung 13}$$

$d_{a,ges}$:	Ermittelter Kopfkreisdurchmesser
$n_1; n_2$:	Anzahl Messwiederholungen
$d_{a1,i}; d_{a2,i}$:	Gemessener Kopfkreisdurchmesser

Ein weiteres relevantes Maß stellt die ausgeformte Zahnbreite dar (Bild 25). Dieses Maß wird für jeden Zahn einzeln ermittelt und im Anschluss über die jeweils vier mit gleichen Verzahnungsgeometrien vorhandenen Zähne pro Rad gemittelt.

$$b_{ges} = \frac{1}{4 \cdot n} \left(\sum_{i=1..n} b_{1,i} + \sum_{i=1..n} b_{2,i} + \sum_{i=1..n} b_{3,i} + \sum_{i=1..n} b_{4,i} \right) \quad \text{Gleichung 14}$$

b_{ges}	:	resultierende Zahnbreite
$b_1; b_2; b_3; b_4$:	Zahnbreiten der unterschiedlichen Zähne einer Geometrie pro Rad
n	:	Anzahl Messwiederholungen

5.4.3 Bewertung der Parametereinflüsse auf relevante Bauteilmaße

Anhand der vollfaktoriellen Versuchsplanung und Durchführung kann die Bewertung der relevanten Bauteilmaße vorgenommen werden. Die Bewertung weist dabei neben den eigentlichen Einflüssen der unterschiedlichen Parameter auch die Wechselwirkungen verschiedener Parameter auf die relevanten Bauteilmaße nach. Dies ist vor allem vor dem Hintergrund interessant, dass hierdurch eine zusätzliche Eingriffsmöglichkeit in den Prozess zur Aufrechterhaltung der Gutteilproduktion genutzt werden kann.

Für die Umformung muss die notwendige Fließspannung überwunden werden. Die Fließspannung ist hierbei unter anderem abhängig von der Werkstücktemperatur und der Umformgeschwindigkeit, die von der Stößelgeschwindigkeit abhängig ist. Als Versuchsparameter wurden daher die Werkstücktemperatur, die Stößelgeschwindigkeit und der maximale Stößelweg gewählt.

Als wichtigster Einflussfaktor für den Umformvorgang stellt sich erwartungsgemäß der maximale Stößelweg heraus. Dies ist dadurch zu erklären, dass die Umformung der Bauteile durch die Stößelbewegung eingeleitet und gestoppt wird. In Bild 26 ist der Verlauf der Umformkraft über den Stempelweg beispielhaft dargestellt.

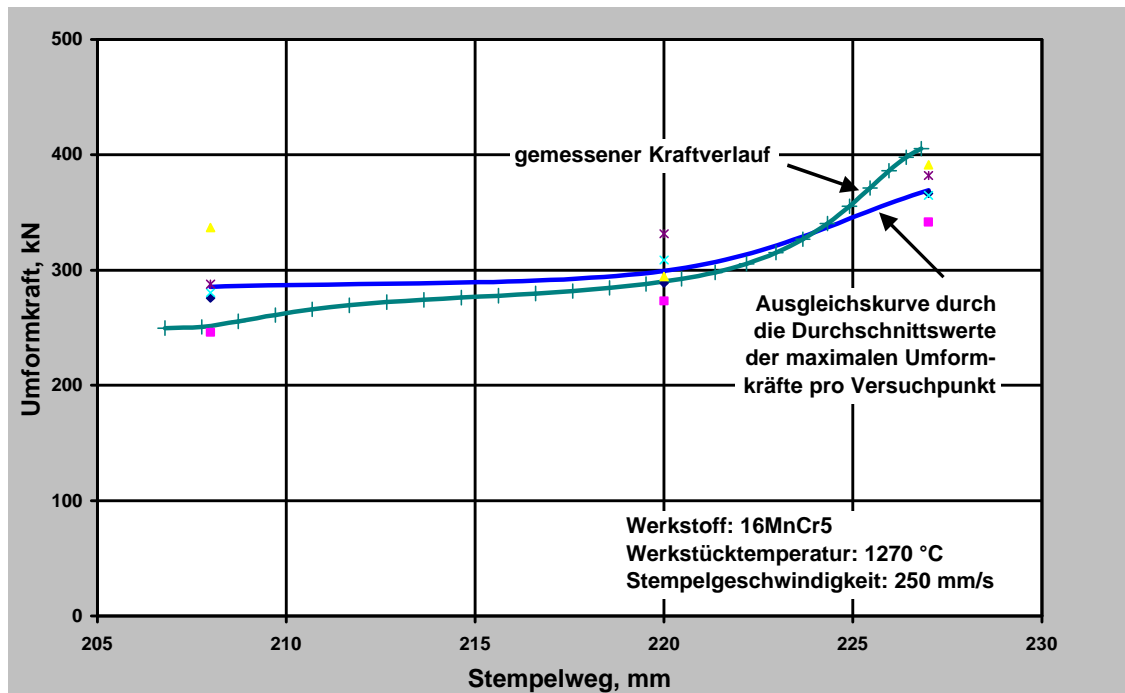


Bild 26: Darstellung der Umformkraft über den Stempelweg

Die einzelnen Punkte im Diagramm entsprechen hierbei jeweils der maximalen Umformkraft eines durchgeführten Versuchs. Es ist zu erkennen, dass die maximale Umformkraft mit steigendem Stempelweg zunimmt. Als Vergleich ist ein gemessener Kraftverlauf dargestellt. Es ergibt sich aus den Durchschnittswerten der Maximalkräfte der einzelnen Versuche ein qualitativ gleicher Verlauf, wie der gemessene Verlauf der Umformkraft eines Umformvorganges.

Die maximale Umformkraft ist neben dem zurückgelegten maximalen Stößelweg von der Werkstücktemperatur abhängig. Durch die Erhöhung der Werkstücktemperatur von 1240 °C auf 1270 °C konnte die maximale Umformkraft bei allen Stempelstellungen gesenkt werden. Dieses Ergebnis ist in **Bild 27** dargestellt.

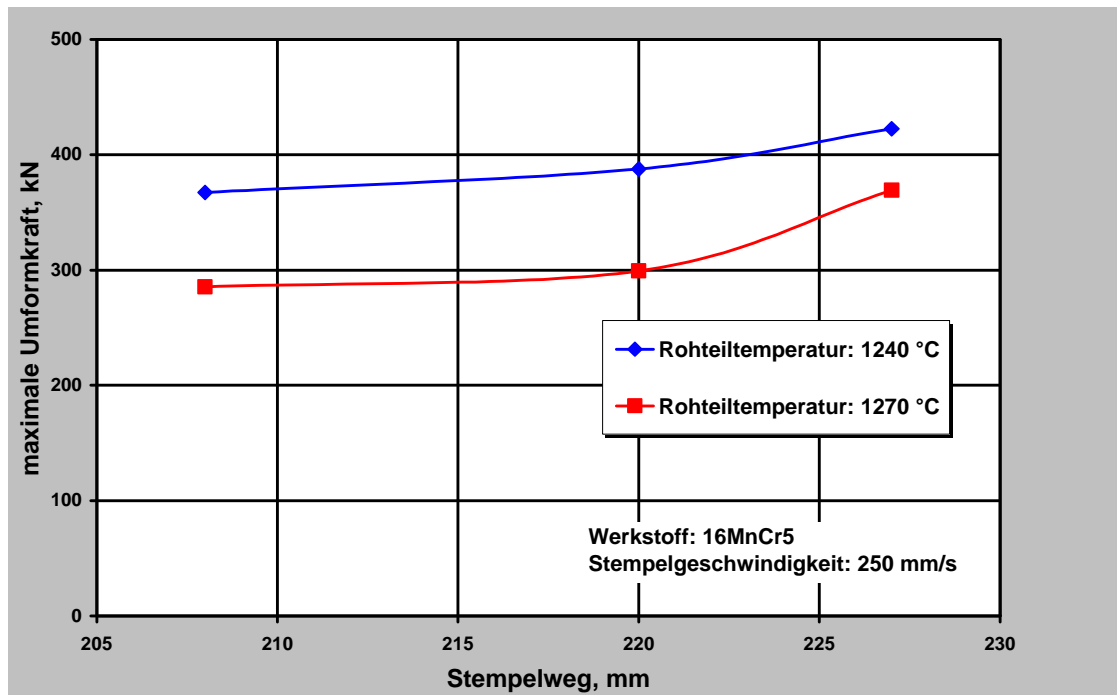


Bild 27: Darstellung der Umformkraft über den Stempelweg in Abhängigkeit der Rohteiltemperatur

Die Stößelgeschwindigkeit hingegen zeigte bei den Untersuchungen keinen signifikanten Einfluss auf die maximale Umformkraft (**Bild 28**).

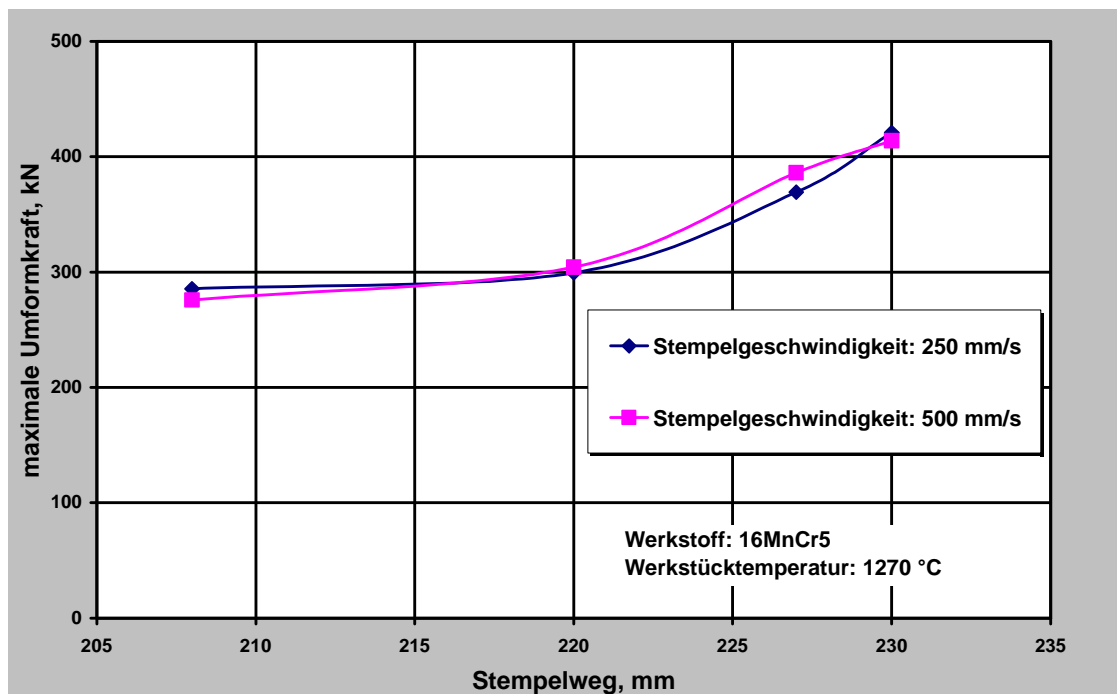


Bild 28: Darstellung der Umformkraft über den Stempelweg in Abhängigkeit der Stempelgeschwindigkeit

Das Maß der Beeinflussung jedes einzelnen Parameters und die daraus resultierenden Wechselwirkungen werden mit Hilfe der F-Testgröße bewertet.

In Bild 29 werden die Ergebnisse in Zahlenwerten dargestellt. Hierbei bedeutet ein hoher Wert einen hohen Einfluss, ein niedriger Wert einen niedrigen

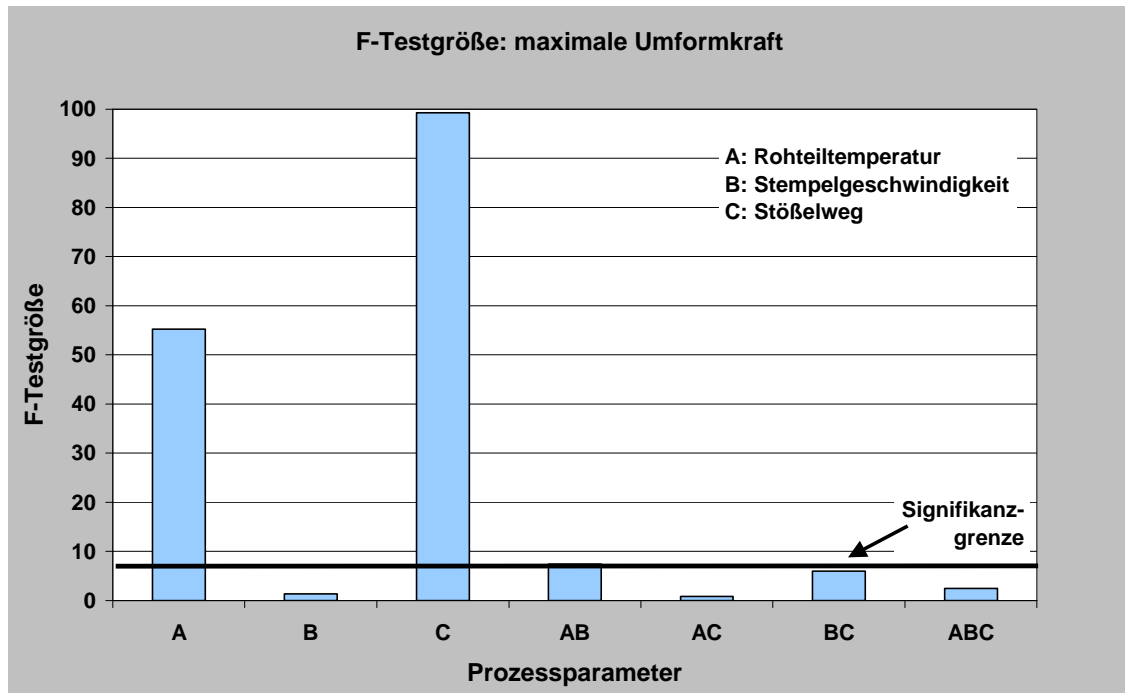


Bild 29: Einfluss der Versuchsparameter (F-Testgröße)

Im Folgenden werden die relevanten Bauteilmaße Kopfkreisdurchmesser und ausgeformte Zahnbreite untersucht. Hierbei wird die maximale Umformkraft als entscheidender Einflussfaktor betrachtet. Dies Vorgehen gründet sich auf die Sachverhalte, dass zum einen die maximale Umformkraft durch die untersuchten Prozessparametern abhängig ist zum anderen die Presskraftüberwachung in der Praxis einfach zu realisieren ist und somit die Ergebnisse der Arbeit in die Praxis überführt werden können.

Beispielhaft werden in den folgenden Abschnitten die Untersuchungen mit einer Parametereinstellung dargestellt. Die Untersuchungen der anderen Parametervariationen ergaben gleiche Ergebnisse.

5.4.3.1 Kopfkreisdurchmesser

Die Kopfkreisdurchmesser der unterschiedlichen Zahngeometrien variieren in bestimmten Grenzen. Dies ist durch die Definition des Kopfkreisdurchmessers in Abhängigkeit der hier untersuchten Verzahnungsdaten (Modul und Eingriffswinkel) begründet. Weiterhin ist für die Untersuchungen die Zahnkontur in derart angepasst worden, dass die Geometrie der Zahnköpfe spitz zulaufen und keine Kopfkreisrundungen aufweisen. Hierdurch ergibt sich eine Abweichung des tatsächlichen zum berechneten Kopfkreis.

$$d_a = \frac{z \cdot m}{\cos \beta} + 2 \cdot m \quad \text{Gleichung 15}$$

d_a	:	Kopfkreisdurchmesser
z	:	Zähnezahl des vollständigen Rades
m	:	Modul (Normalmodul)
β	:	Schrägungswinkel

Die Kopfkreisdurchmesser der unterschiedlichen Varianten sind in Tabelle 5 dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass jeweils zwei Varianten annähernd gleiche Kopfkreisdurchmesser aufweisen. Dies ist durch die in Gleichung 15 beschriebene Abhängigkeit begründet. Diese Varianten unterscheiden sich jeweils durch den Eingriffswinkel.

Zur Bewertung der unterschiedlichen Formfüllungen der Zahngeometrien wird als Bezugsgröße die jeweilige maximale Umformkraft gewählt. Der Vergleich der Formfüllung über der maximalen Umformkraft ist für die Übertragbarkeit der Ergebnisse am besten geeignet.

Tabelle 5: Verzahnungsdaten der unterschiedlichen Varianten

Zahn	Zähnezahl [z]	Modul [m, mm]	Schrägungswinkel [b, °]	Eingriffswinkel [a, °]	Profilverschiebung [x]	Teilkreis-Ø [d, mm]	Fußkreis-Ø [d _f , mm]	Grundkreis-Ø [d _b , mm]	Kopfkreis-Ø [d _a , mm]
1	18	2,7500	0,0	17,5	0,000	49,50	44,00	10,86	57,50
2	26	1,8333	0,0	17,5	0,000	47,67	44,00	10,46	53,00
3	33	1,4194	0,0	17,5	0,000	46,84	44,00	10,28	50,80
4	18	2,7500	0,0	15,0	0,000	49,50	44,00	37,60	57,75
5	26	1,8300	0,0	15,0	0,000	47,58	43,92	36,15	53,30
6	33	1,4200	0,0	15,0	0,000	46,86	44,02	35,60	51,20

Die Abhängigkeit zwischen Kopfkreisdurchmesser und Umformkraft ist in Bild 30 dargestellt. Hierbei ist der Absolutwert der Kopfkreisdurchmesser aufgetragen. Die Messwerte gruppieren sich nach dem Parameter Modul der Verzahnungsgeometrie (vgl. Gleichung 15).

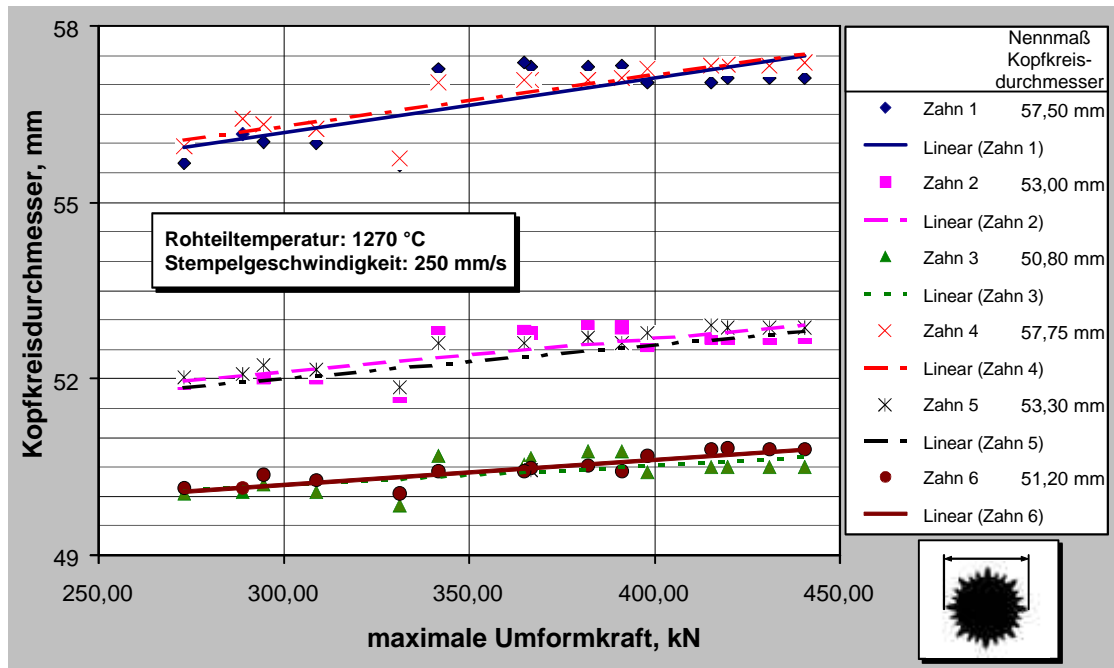


Bild 30: Absoluter Kopfkreisdurchmesser über die maximale Umformkraft

Für die genauere Vergleichbarkeit der verschiedenen Verzahnungsgeometrien werden die relativen Kopfkreisdurchmesser (Gleichung 16) über der maximalen Umformkraft dargestellt (Bild 31).

$$d_{a,rel} = \frac{d_{a,ges}}{d_{a,Nenn}} \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 16}$$

- $d_{a,rel}$: relativer Kopfkreisdurchmesser
- $d_{a,ges}$: Ermittelter Kopfkreisdurchmesser
- $d_{a,Nenn}$: Nennmaß Kopfkreisdurchmesser

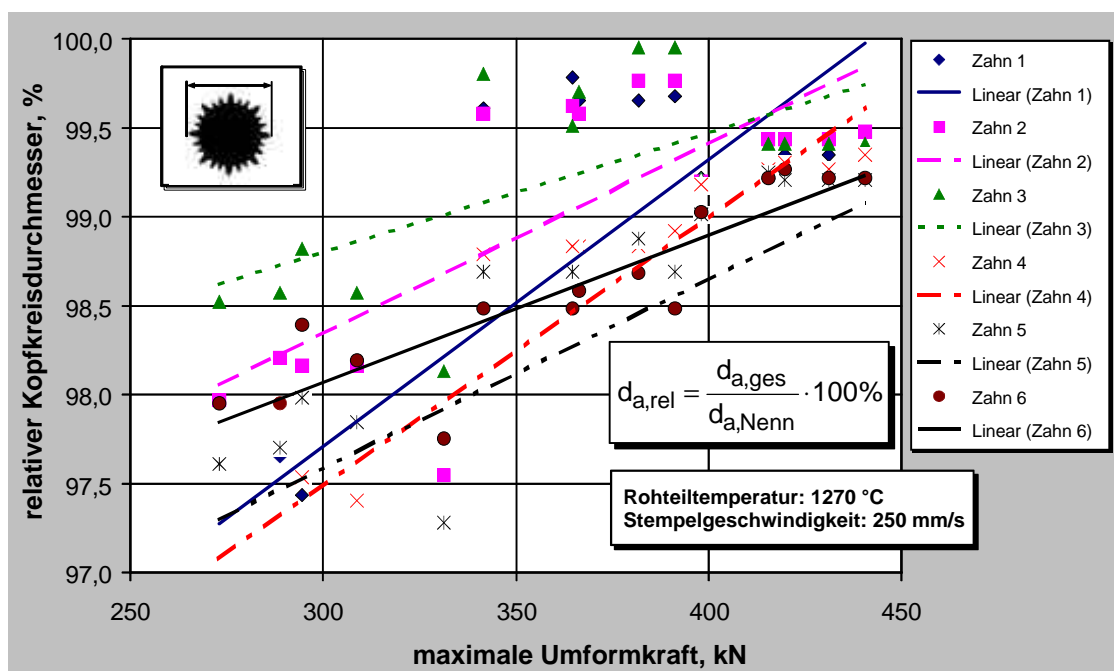


Bild 31: Relativer Kopfkreisdurchmesser über die maximale Umformkraft

Aus dieser Darstellung lassen sich verschiedene grundlegende Erkenntnisse gewinnen.

Die Formfüllung in Abhängigkeit von den verschiedenen Modulen lässt sich folgendermaßen beschreiben:

- Mit steigendem Modul nimmt die Abhängigkeit der Formfüllung von der maximalen Umformkraft zu.

Die Formfüllung in Abhängigkeit vom Eingriffswinkel lässt sich wie folgt beschreiben:

- Je größer der Eingriffswinkel der Verzahnung, desto größer ist die relative Formfüllung in Bezug auf den Kopfkreisdurchmesser.

Dies bedeutet, dass die Umformung durch die Wahl eines kleinen Moduls und eines großen Eingriffswinkels in Bezug auf die Formfüllung zu Beginn des Prozesses unterstützt wird, da geringere Umformkräfte auftreten. Falls Verzahnungen nicht exakt ausgebildet werden müssen, so sind diese eben genannten Verzahnungscharakteristiken für die Umformung von Vorteil.

Wenn die exakte Ausformung der Bauteile aus konstruktiven Gründen jedoch unausweichlich ist, so ist ein größerer Modul und ein größerer Eingriffswinkel für den optimierten Umformprozess zu wählen.

Diese Aussagen sollten bei der Konstruktion von Verzahnungen berücksichtigt werden, wenn das Präzisionsschmieden für die Fertigung in Betracht gezogen wird.

5.4.3.2 Ausgeformte Zahnbreite

Die ausgeformte Zahnbreite (Bild 25) kann Einfluss auf die übertragbare Leistung der Verzahnung haben. Aus diesem Grund ist sie ein wichtiges Maß für die Bewertung der Einsatzfähigkeit von gefertigten Verzahnungen /11/. Die relative Zahnbreite ist wie folgt definiert (Gleichung 17).

$$b_{\text{rel}} = \frac{b_{\text{ges}}}{b_{\text{Nenn}}} \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 17}$$

- b_{rel} : relative Zahnbreite
- b_{ges} : gemessene Zahnbreite
- b_{Nenn} : Nenngröße der Zahnbreite

Repräsentativ für alle durchgeführten Versuche ist in Bild 32 die relative Zahnbreite über die maximale Umformkraft bei einer Parametereinstellung aufgetragen. Hierbei ist zu erkennen, dass die ausgeformte Zahnbreite mit zunehmender Kraft ansteigt.

Hierbei unterscheiden sich die unterschiedlichen Verzahnungen in folgender Weise:

- Je geringer der Modul, desto höher ist die relative Zahnbreitenfüllung bei geringen Kräften.

- Bei zunehmender Umformkraft gleichen sich die relativen Zahnbreitenfüllungen unterschiedlicher Module an.

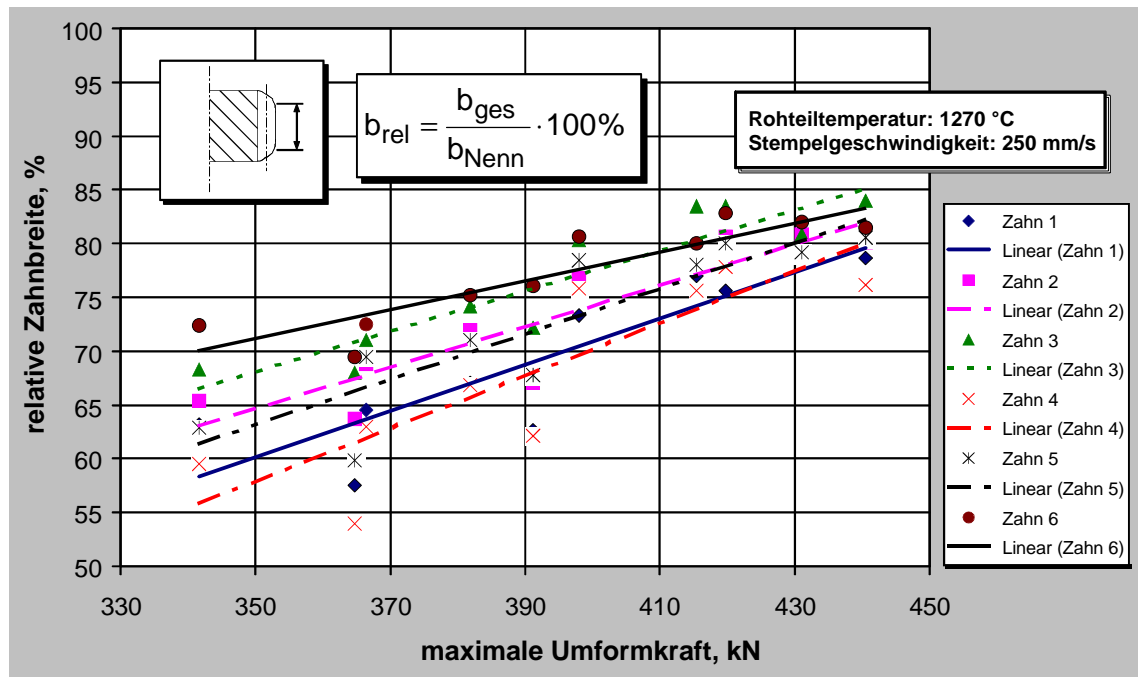


Bild 32: Relative Zahnbreite über der Umformkraft

Die benötigte Zahnbreitenfüllung begründet sich aus den Anforderungen an die Verzahnung. Es ist daher bei jeder Verzahnung zu überprüfen, in wie weit die Geometrie exakt ausgeformt sein muss. In der Praxis werden heute spanend hergestellte Verzahnungen an den Kanten gebrochen. Dies führt dazu, dass im Kopfbereich der Verzahnung nicht die gesamte Zahnbreite vorhanden ist. Diese Vorgehensweise hat verschiedene Gründe. Zum einen wird die Laufruhe der Verzahnung erhöht, zum anderen ist die manuelle Handhabung der Bauteile mit gebrochenen Kanten für den Bediener einfacher und sicherer. Diese in der Praxis angewandte Vorgehensweise zeigt, dass präzisionsgeschmiedete Verzahnungen nicht 100 %-ig ausgeformt sein müssen, um verbaut zu werden. Ausgehend von Tragbildern von Verzahnungen ist die 100 %-ige Ausformung der Zahnbreite ebenfalls nicht erforderlich, da in den Eckbereichen keine Krafteinleitung erfolgt. In **Bild 33** ist eine Zahnflanke mit den dazugehörigen Geometriedaten dargestellt.

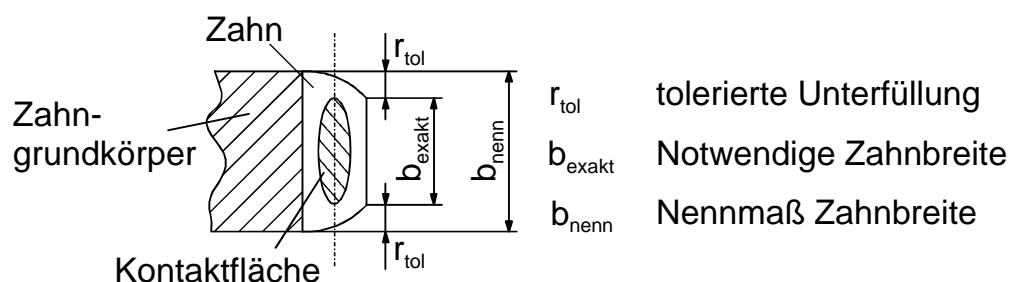


Bild 33: Darstellung der benötigten Zahnbreitenfüllung

Aus den genannten Gründen kann die exakte Ausformung der Zahnbreite je nach tolerierter Unterfüllung wie folgt definiert werden:

$$b_{\text{exakt}} = b_{\text{nenn}} - 2 \cdot r_{\text{tol}} \quad \text{Gleichung 18}$$

b_{exakt}	:	minimale tolerierbare Zahnbreite, gilt als exakt ausgeformt
b_{nenn}	:	Nennmaß Zahnbreite
r_{tol}	:	tolerierte Unterfüllung

$$b_{\text{exakt,rel}} = \left(1 - \frac{2 \cdot r_{\text{tol}}}{b_{\text{nenn}}} \right) \cdot 100\% \quad \text{Gleichung 19}$$

$b_{\text{exakt,rel}}$:	relative minimale tolerierbare Zahnbreite
------------------------	---	---

Aus den Anforderungen, die die Nutzer an die Formfüllung der Verzahnung stellen, ergibt sich die benötigte Ausformung der Verzahnung für jedes Bauteil individuell. Mit Hilfe des Diagramms aus Bild 32 können Anhaltswerte für die benötigte Umformkraftbedarf bei gewünschter Zahnbreitenfüllung abgeleitet werden.

5.4.4 Hinweise für die Prozessauslegung von verzahnten Bauteilen

Aus den Erkenntnissen des vorangegangenen Abschnittes kann folgendes für die Prozessauslegung von verzahnten Bauteilen festgehalten werden:

- Mit steigendem Modul nimmt die Abhängigkeit der Formfüllung von der maximalen Umformkraft zu.
- Je größer der Eingriffswinkel der Verzahnung, desto größer ist die relative Formfüllung in Bezug auf den Kopfkreisdurchmesser.
- Je geringer der Modul, desto höher ist die relative Zahnbreitenfüllung bei geringen Kräften.
- Bei zunehmender Umformkraft gleichen sich die relativen Zahnbreitenfüllungen unterschiedlicher Module an.

Hieraus ergeben sich für die Konstruktion von verzahnten Bauteilen folgende Hinweise:

- Je größer der Modul gewählt wird, desto geringer ist die maximal benötigte Umformkraft zur exakten Ausformung des Kopfkreises.
- Je größer der Eingriffswinkel der Verzahnung gewählt wird, desto geringer sind die notwendigen Umformkräfte.
- Die benötigte Zahnbreitenfüllung ist den Bedürfnissen einer optimalen Leistungsübertragung anzupassen. Hierbei ist die notwendige Zahnbreite auf ein Minimum zu begrenzen.

Aus diesen Hinweisen ergibt sich für die Auslegung von umformtechnisch günstig herzustellenden Verzahnungen die Forderung nach großem Modul und großem Eingriffswinkel sowie einer auf die Anforderungen des Getriebes angepassten Zahnfüllung.

Für zukünftige Entwicklungen von verzahnten Bauteilen ergibt sich daher die Notwendigkeit nach einer umformtechnisch optimierten Verzahnungsauslegung. Untersuchungen von Höhn /58/ ergaben, dass umformtechnisch hergestellte Verzahnungen hierbei im Lauf- und Geräuschverhalten den spanenden Varianten vergleichbar sind.

Unter Ausnutzung dieser Hinweise kann die umformtechnische Herstellung von verzahnten Bauteilen realisiert werden. Hierbei stellen sich bei geeigneter Wahl der Bauteilgeometrie, z. B. großer Modul und größerer Eingriffswinkel, günstige Formfüllungen bei geringen Kräften ein. Solche Bauteile (Bild 34) wurden am IFUM in zahlreichen Arbeiten durch das Präzisionsschmieden hergestellt /6/9/10/11/.

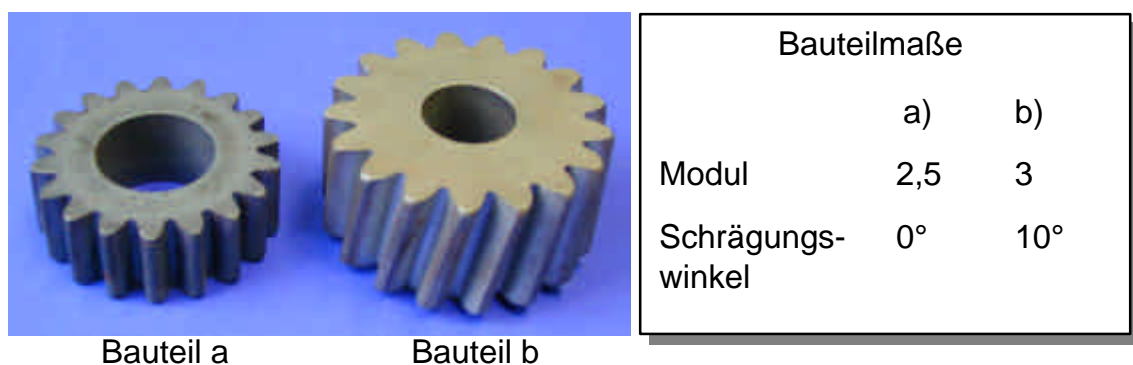


Bild 34: Präzisionsgeschmiedete Verzahnungen

Der Wunsch der Kunden geht jedoch hin zu komplexen Bauteilen mit filigranen Verzahnungen. Dies ist durch die hohen Ansprüche an das Laufverhalten von Zahnradpaarungen in Getrieben begründet. Bei der Großserienfertigung von Getrieben ist die Pkw-Industrie als wichtigster Hersteller zu betrachten. Bei der Auslegung und Herstellung dieser Getriebe wird auf verschiedene Randbedingungen geachtet. Dies sind neben anderen:

- Die Bauteilfestigkeit,
- die Genauigkeit der Funktionsflächen,
- die Größe und daraus der benötigte Bauraum sowie
- das Gewicht.

Die Anforderungen in Bezug auf Bauteilfestigkeit sowie Größe und damit auch auf das Gewicht erfüllen präzisionsgeschmiedete Bauteile in besonderem Maße (siehe Bild 5, Seite 7, und Bild 9, Seite 11).

Die Geometrien von Verzahnungen sind heutzutage für die spanende Fertigung optimiert. Um den Nachweis zu erbringen, dass umformtechnisch hergestellte Bauteile Vorteile gegenüber spanend hergestellten aufweisen und die spanende Weichbearbeitung in Zukunft substituieren könnten, ist es notwendig, die zur Zeit im Einsatz befindlichen Geometrien zu fertigen. Diesem Ansatz folgend, ist im Folgenden die Fertigung eines Pkw-Gangrads durch Präzisions-

schmieden untersucht worden. Hierdurch soll das Potential des Präzisionsschmiedens für komplexe Antriebsbauteile aufgezeigt werden.

6 Präzisionsschmieden von komplexen Antriebsbauteilen am Beispiel eines Pkw-Gangrades

6.1 Entwicklung eines Verfahrens zum Präzisionsschmieden von Pkw-Gangrädern

Das untersuchte Bauteil ist ein doppelt verzahntes Rad aus dem Getriebe eines Pkw, welches bis heute ausschließlich spanend hergestellt wird (Bild 35).



Bild 35: Untersuchtes Pkw-Gangrad

Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten soll dieses Bauteil durch Präzisionsschmieden aus einer Schmiedewärme so weit hergestellt werden, dass lediglich die schnelllaufenden und die abwälzenden Funktionsflächen des Bauteils im Anschluss an eine Wärmebehandlung durch spanende Hartfeinbearbeitungsmethoden (Schleifen, Hartdrehen, etc.) fertigbearbeitet werden müssen. Danach ist das Bauteil einbaufertig. So kann die Prozesskette durch Einsparung der spanenden Weichbearbeitung drastisch verkürzt und die Wirtschaftlichkeit der gesamten Prozesskette erhöht werden. Die durch das Präzisionsschmieden zu realisierende Verkürzung kann aus der Gegenüberstellung der konventionellen mit der durch Präzisionsschmieden optimierten Prozesskette aus Bild 36 entnommen werden.

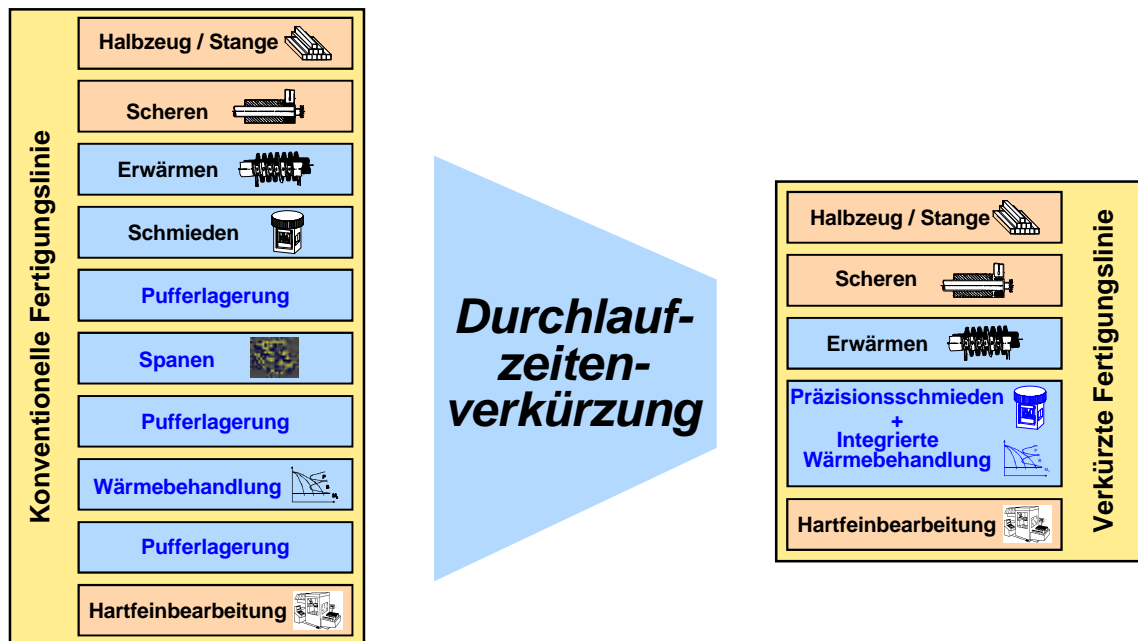


Bild 36: Vergleich der konventionellen und der durch Präzisionsschmieden optimierten Prozesskette zur Herstellung von Zahnrädern

Eine exakte Führung und Einhaltung der Schmiedeparameter ist eine Grundvoraussetzung für die Fertigung von Präzisionsschmiedeteilen. Wichtige Parameter für Präzisionsschmiedeprozesse sind:

- Rohteilmasse,
- Rohteiltemperatur,
- Werkzeugtemperatur,
- Umformgeschwindigkeit und
- Umformkraft bzw. Schlagenergie.

Die Einhaltung der engen Toleranzen beim Präzisionsschmieden (z. B. Toleranz der Rohteilmasse = $\pm 0,5\%$) wird durch den Einsatz der CA-Methoden erleichtert. Hierzu gehören neben der CAD-unterstützten Auslegung der Werkzeuge auch die Weitergabe der erzeugten Geometriedaten an die Fertigungsmaschinen. So können die für das Präzisionsschmieden erforderlichen Genauigkeiten im Werkzeugbau leichter realisiert werden /53/.

6.1.1 Anforderungen an präzisionsgeschmiedete Pkw-Gangräder

Gangräder werden im Getriebe als „schaltbare“ Räder eingesetzt. Ihnen kommt die Aufgabe zu, die Kraftübertragung von der Antriebs- auf die Abtriebswelle zu gewährleisten, wobei die Laufverzahnung im ständigen Eingriff mit dem Gegenrad ist und diese aufeinander abwälzen.

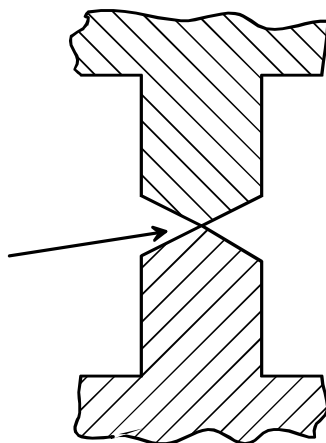
Einsatzfertige Laufverzahnungen müssen nach den Anforderungen der Automobilhersteller Qualitätsstufen von mindestens IT 6-7 aufweisen. Hierbei beziehen sich die Qualitätsanforderungen auf die verschiedensten Geometriegrößen der Verzahnung (DIN 3960 ff). Die Verzahnungsgeometrien haben neben der reinen Funktionalität des Bauteils weitere Anforderungen zu erfüllen. Im Bereich der Hochleistungsgetriebe, die in der Automobilindustrie

zum Einsatz kommen, spielt die Vermeidung von Schwingungen und Lärm eine entscheidende Rolle.

Für den Präzisionsschmiedeprozess bedeutet dies, dass relevante Bauteilgeometrien wie der Kopfkreisdurchmesser exakt ausgeformt sein müssen. Die Hartfeinbearbeitung der Laufverzahnung sowie der anderen zu bearbeitenden Flächen benötigt ein äquidistantes Aufmaß auf der Verzahnung von ca. 0,1 mm, um eine optimale Qualität des finalen Bauteils zu gewährleisten.

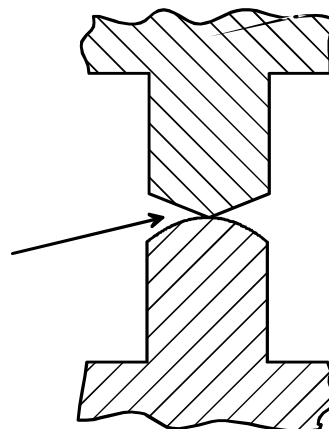
Bei der ebenfalls umformtechnisch hergestellten Kupplungsverzahnung liegen die höchsten Genauigkeitsanforderungen im Bereich des Zahndachs. Das Zahndach der Kupplungsverzahnung hat zusammen mit dem Zahndach der Schalmuffe die Aufgabe, den Schaltvorgang ohne störenden Widerstand („Haken“) zu realisieren. Hierfür ist es erforderlich, dass die Dachkanten exakt ausgeformt sind. Nur hierdurch kann gewährleistet werden, dass Flächen nicht horizontal aufeinander stehen und die Schalmuffe leicht einzuschieben ist (Bild 37).

Dach der Kupplungsverzahnung ideal geformt
(ideale Spitzen)



Abgleiten der Verzahnungsdächer
gut möglich

Dach der Kupplungsverzahnung nicht ideal geformt
(gewölbte Oberfläche)



Abgleiten der Verzahnungsdächer
schlecht möglich

Bild 37: Auswirkung der Dachausformung der Kupplungsverzahnung auf das Schaltverhalten

Im Gegensatz zur Laufverzahnung befindet sich die Schaltverzahnung lediglich bei entsprechend eingelegtem Gang mit der Schiebemuffe im Eingriff. Die Zahnflanken der Kupplungsverzahnung wälzen nicht auf einander ab, sondern haben lediglich die Aufgabe eine formschlüssige Verbindung zur Kraftübertragung herzustellen.

In Bild 38 ist ein Ausschnitt aus einem Schaltgetriebe dargestellt. Man erkennt deutlich die Schalmuffe, die sich nicht im Eingriff befindet.

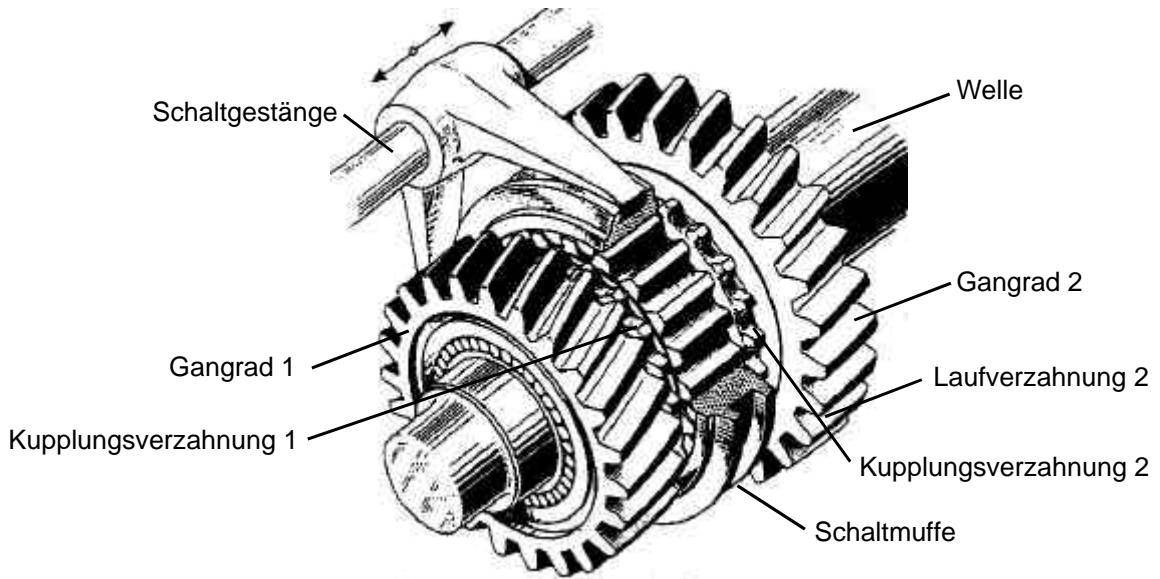


Bild 38: Ausschnitt eines Schaltgetriebes (Schaltmuffe nicht im Eingriff)

Die feingliedrige, scharfkantige Ausbildung der Dachform, die für ein „hakenfreies“ einlegen der Gänge verantwortlich ist, entstammt der konstruktiven Anforderung an spanend hergestellte Bauteile.

Die Anforderung an ein exakt ausgeformtes, d.h. scharfkantiges Bauteil, ist umformtechnisch nur durch erhöhte Umformkräfte zu erreichen. Dies führt zu einer starken mechanischen Beanspruchung des Werkzeugsystems /11/. Aus diesem Grund ist für eine wirtschaftliche Herstellung die fertigungsgerechte Gestaltung von Bauteilen unabdingbar.

Neben dem Bereich der Kupplungs- und Laufverzahnung bestehen Gangräder noch aus einer Vielzahl weiterer Funktionsflächen. Diese Flächen am Pkw-Gangrad, welche im Mittelpunkt der Untersuchungen dieser Arbeit stehen, sind in **Bild 39** dargestellt. Der Anlaufkonus, die Stirnflächen sowie die Bohrung des Rades sind ebenfalls als eng tolerierte Geometrien ausgelegt.

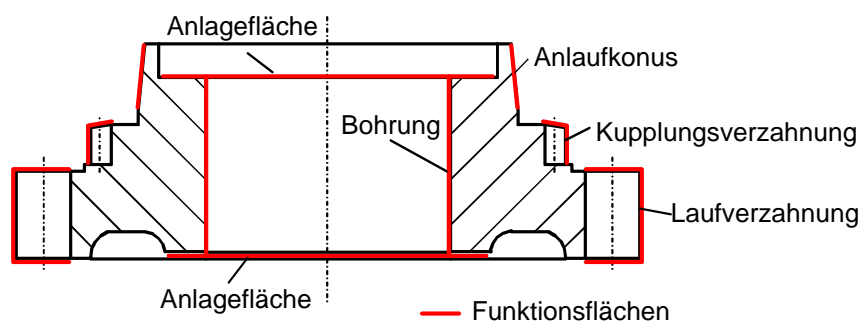


Bild 39: Funktionsflächen des Pkw-Gangrades

Über die allgemeinen Anforderungen an die Funktionsflächen (Rauigkeit, Geradheit, Rundheit, etc.) hinaus, müssen bei diesem Bauteil weitere Bedingungen an Lage- und Formgenauigkeit der Funktionsflächen gestellt werden.

So dürfen z. B. die Abweichungen des Rundlaufs von Bohrung, Lauf- und Kupplungsverzahnung sowie des Anlaufkonus nur im Bereich von 35 - 80 µm zueinander liegen, um die Funktion des fertigbearbeiteten Bauteils zu gewährleisten. Anderenfalls würde die Laufverzahnung nicht einwandfrei abwälzen, oder die Schaltmuffe könnte nicht über die Schaltverzahnung geschoben werden.

Durch die spanende Hartfeinbearbeitung können im Anschluss an den Schmiedevorgang kleinere Toleranzschwankungen der einzelnen Funktionsflächen ausgeglichen werden. Bei zu großen Abweichungen besteht keine Möglichkeit zur exakten Bearbeitung durch einen Spanprozess /54/.

Die Nenngrößen des untersuchten Gangrads sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Auflistung ausgewählter Nenngrößen

Gangradnenngrößen			
Laufverzahnung:		Kupplungsverzahnung:	
Zähnezahl	35	Zähnezahl	33
Normalmodul	2,00 mm	Normalmodul	2,12 mm
Profilverschiebungsfaktor	0,07 mm	Profilverschiebung	0,45 mm
Teilkreisdurchmesser	84,77 mm	Teilkreisdurchmesser	69,85 mm
Eingriffswinkel	17,5 °	Eingriffswinkel	30,0 °
Schrägungswinkel	34,33 °	Schrägungswinkel	0,0 °
Zahnbreite	14,75 mm	Hinterschneidung	2,75 °
Bohrungsdurchmesser	37 G6		
Gesamthöhe	32,65 mm		

6.1.2 Anforderungen an das Werkzeugsystem

Die stufenarme umformtechnische Herstellung eines Pkw-Gangrades, welches die Funktion des in Bild 35 (Seite 44) dargestellten spanend hergestellten Bauteils erfüllt, stellt hohe Anforderungen an die Auslegung des gesamten Prozesses.

Die Anforderungen an das Werkzeugsystem gliedern sich in folgende Teilaspekte:

- Ausformung der komplexen, feingliedrigen Geometrie des Bauteils sowie
- Einbringung der Hinterschneidungen in die Kupplungsverzahnung.

Diese Anforderungen erfordern verschiedene Werkzeugkonzepte. Zum einen muss zur Ausformung der komplexen, feingliedrigen Geometrie des Bauteils ein robustes Werkzeug zum Einsatz kommen, welches hohe Kräfte aufnehmen kann. Weiterhin darf das Werkzeug keinerlei Anfälligkeit auf die beim Schmiedeprozess herrschenden Randbedingungen, wie z. B. hohe Temperaturen und Verschmutzung durch Zunderreste und Schmierstoff, aufweisen. Zum anderen können hinterschnittene Bauteile wirtschaftlich nur aus einem Werkzeug entfernt werden, wenn sie eine Teilung aufweisen, die den

Hinterschnitt am Bauteil durch öffnen entformen können (Bild 40). Bei der partiellen ortsgebundenen Einbringung der Hinterschnitte werden für die Umformung nur geringe Kräfte benötigt. Hierdurch kann für die Hinterschnitteinbringung ein radial geteiltes Werkzeugsystem eingesetzt werden.

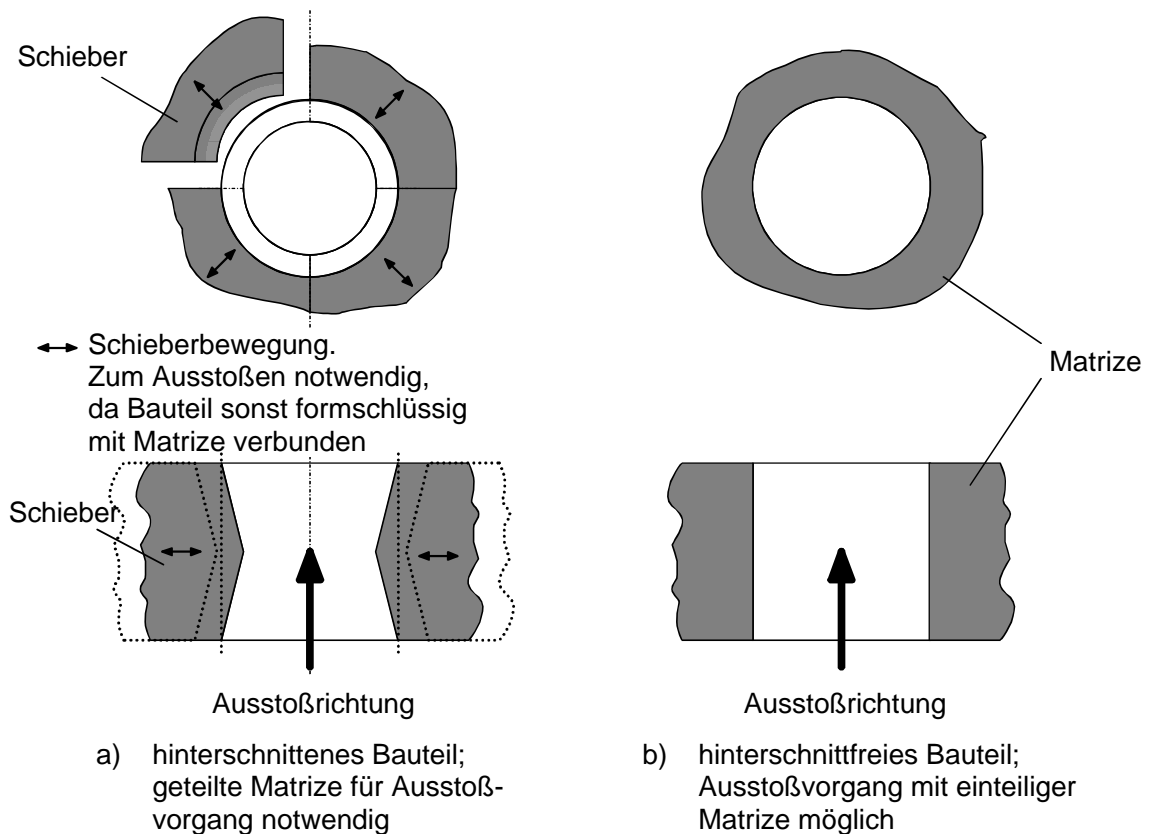


Bild 40: Bauteilentformung bei verschiedenen Werkzeugensystemen (geteilte – ungeteilte Matrize)

Bedingt durch diese gegenläufigen Anforderungen der einzelnen Geometrien an den Umformprozess und somit an das Werkzeugensystem, wurde ein zweistufiger Umformprozess aus einer Schmiedewärme realisiert.

6.1.3 Auslegung des Werkzeugensystems

Zur Formfüllung des komplexen feingliedrigen Gangrads muss in der ersten Umformstufe ein Werkzeug eingesetzt werden, das hohe Kräfte unter reproduzierbaren Bedingungen aufnehmen kann. In diesem System sind Ober- und Untergesenk jeweils einteilig ausgeführt. Weiterhin muss es möglich sein, ein gratfreies Bauteil herzustellen. Dies bedeutet, dass die Funktionen „Werkzeug schließen“ und „Umformen“ zeitlich voneinander getrennt werden müssen. Zur Herstellung eines hinterschnittenen Bauteils in der zweiten Umformstufe bedarf es eines geteilten Werkzeugensystems, bei dem neben der prozesssicheren Herstellung die zerstörungsfreie Entnahme durch das Auseinanderfahren der Werkzeulemente möglich ist. Diese beiden Werkzeugensysteme sind in Bild 41 dargestellt.

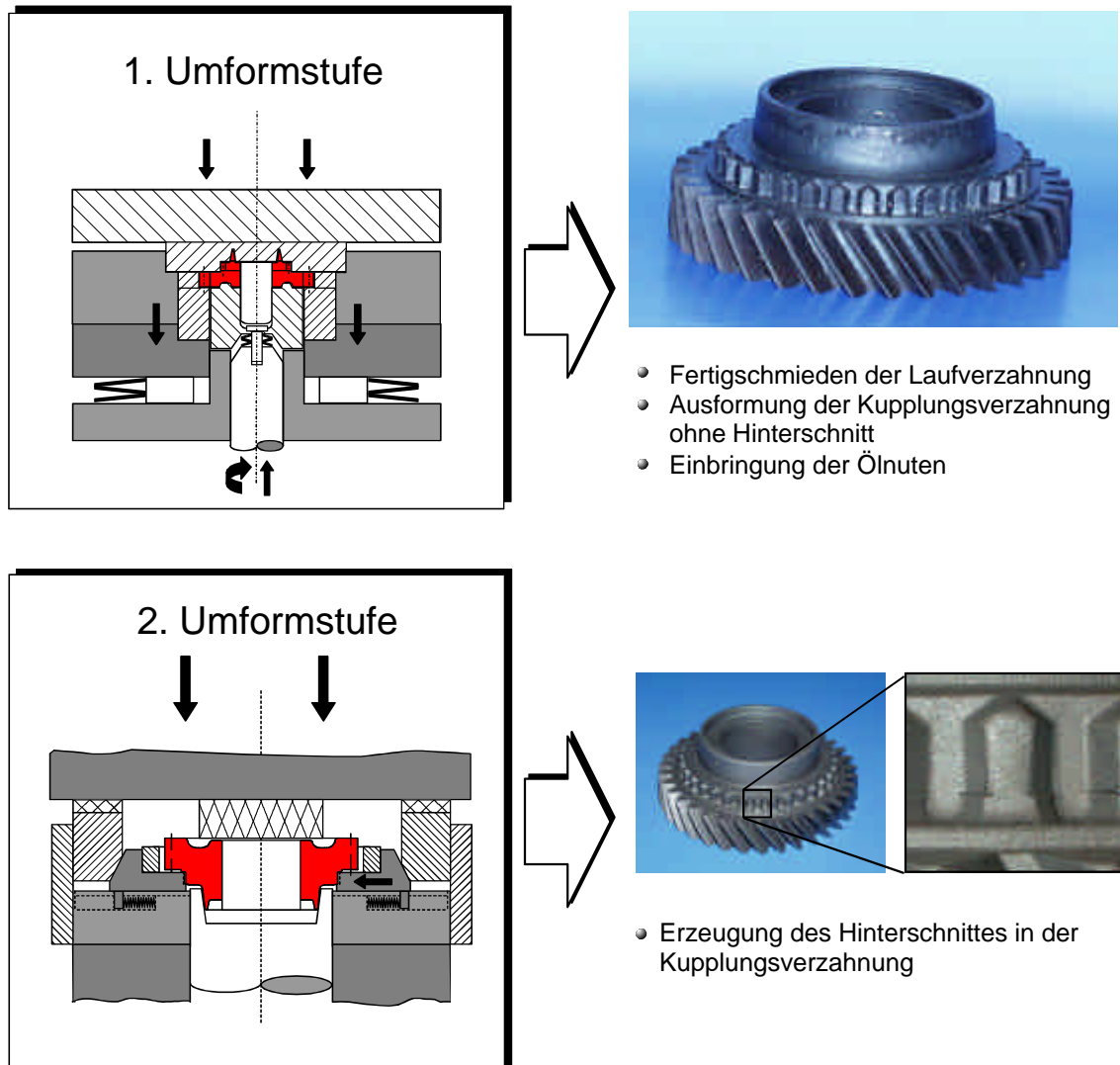


Bild 41: Präzisionsschmiedeverfahren zur Herstellung eines Pkw-Gangrades

Die Umformung der ersten Stufe erfolgt in einem für das Präzisionsschmieden typischen Werkzeugsystem, welches während der Umformung geschlossen ist. Hierbei wird ausgehend von einem auf Schmiedetemperatur erwärmten, geometrisch einfachen Rohteil die gesamte Geometrie des Gangrades bis auf den Hinterschnitt ausgeformt (Bild 42).

Mit dem Werkzeugsystem der zweiten Umformstufe wird der Hinterschnitt in das Bauteil eingebracht. Hierbei handelt es sich um ein Werkzeug, das sich durch seine radial geteilte, formgebende Matrize auszeichnet (Bild 43). Durch die Verwendung dieses Werkzeugsystems ist das zerstörungsfreie Einlegen und Entnehmen des Bauteils bei auseinandergefahrener Matrize möglich. Eine weitere Besonderheit ist, dass die einzelnen Schieber der radial geteilten Matrize bei der Umformung keinen Kontakt miteinander haben. Dies führt zu einem prozesssicherem Werkzeug, da ein Verklemmen der Schieber durch Schmutzpartikel zwischen den Elementen vermieden wird.

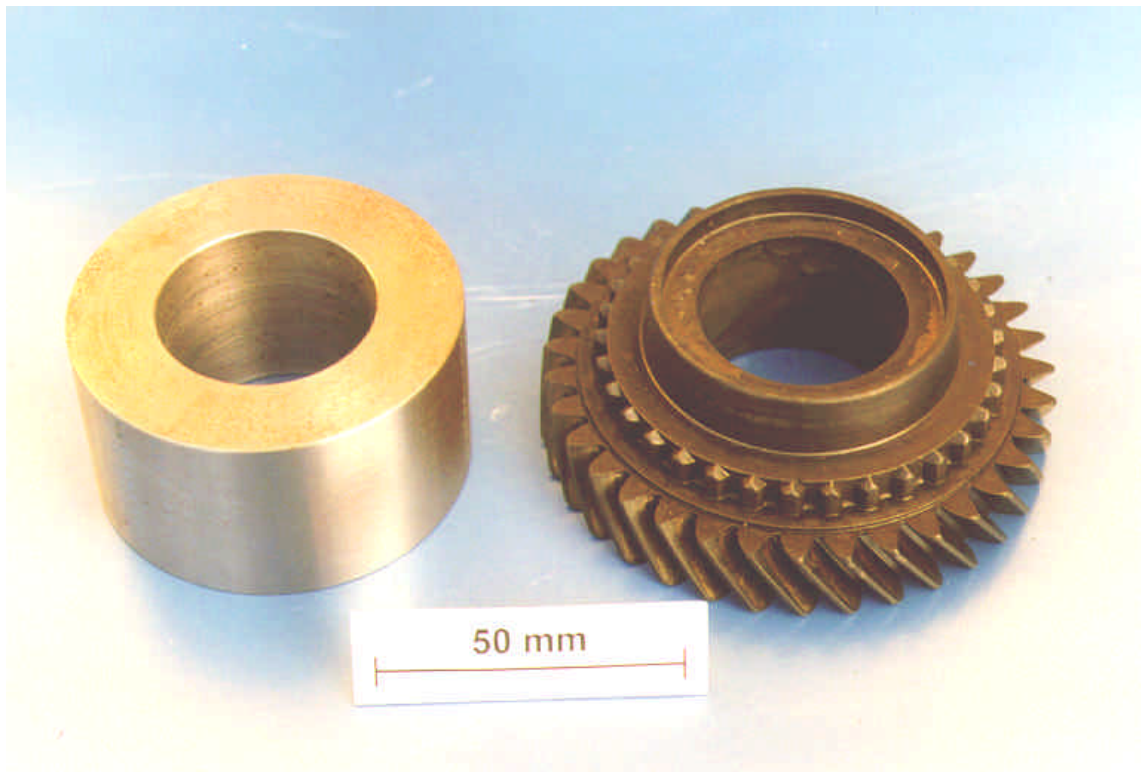


Bild 42: Präzisionsgeschmiedetes Pkw-Gangrad (erste Stufe) mit Rohteil

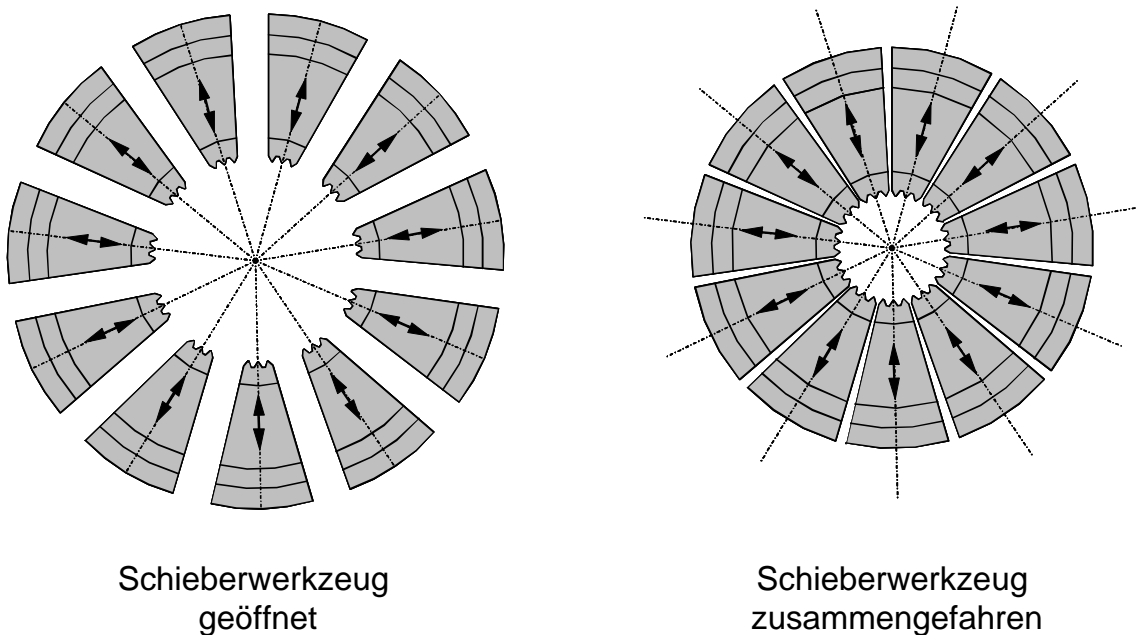


Bild 43: Radiale Teilung der Schieber Elemente der zweiten Umformstufe

Als Rohteil für die zweite Stufe wird das aus der ersten Stufe entnommene Bauteil eingesetzt. So ist die Fertigung aus einer Schmiedewärme möglich. Dies erlaubt zudem die anschließende Wärmebehandlung ohne erneutes Erwärmen des Bauteils.

Bei der Hinterschnittenbringung in der zweiten Umformstufe handelt es sich um eine lokale Umformung mit geringen Umformgraden.

6.1.3.1 Erste Umformstufe

Aufbau des Werkzeugsystems (erste Stufe)

Mit Hilfe des Werkzeugsystems der ersten Umformstufe soll die hinterschnittfreie Geometrie des zu fertigenden Pkw-Gangrades abgebildet werden. Die Anforderungen an das Werkzeug zur Ausformung der hinterschnittfreien Bauteilgeometrie führt zu dem in Bild 44 skizzierten System.

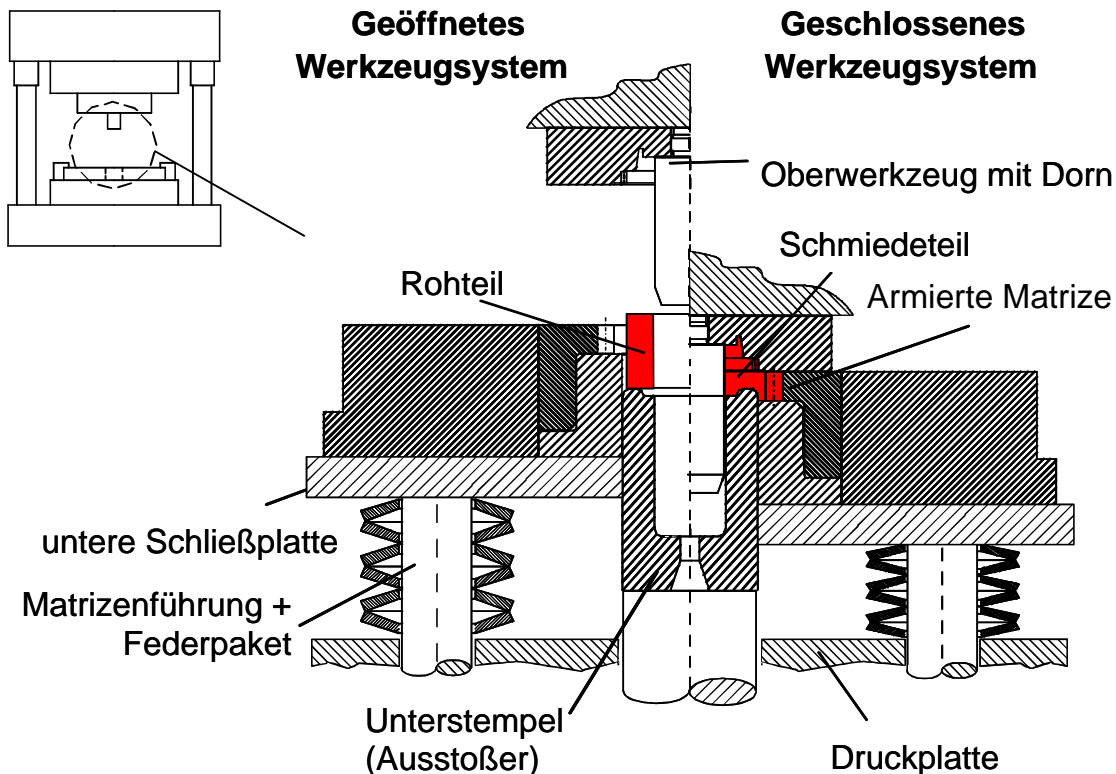


Bild 44: Schematische Darstellung des Umformwerkzeugs der ersten Stufe

Bei dem Werkzeugsystem wird in formgebende und nicht formgebende Elemente unterschieden. Formgebend sind:

- Das Oberwerkzeug mit integriertem Dorn,
- die schrägverzahnte armierte Matrize sowie
- der Unterstampel, der gleichzeitig als Ausstoßer dient.

Nicht formgebende Funktionselemente sind:

- Die untere Schließplatte,
- die Druckplatte und
- die Matrizenführung mit Federpaket.

In Bild 45 ist das Werkzeugsystem im Presseneinbauraum dargestellt.

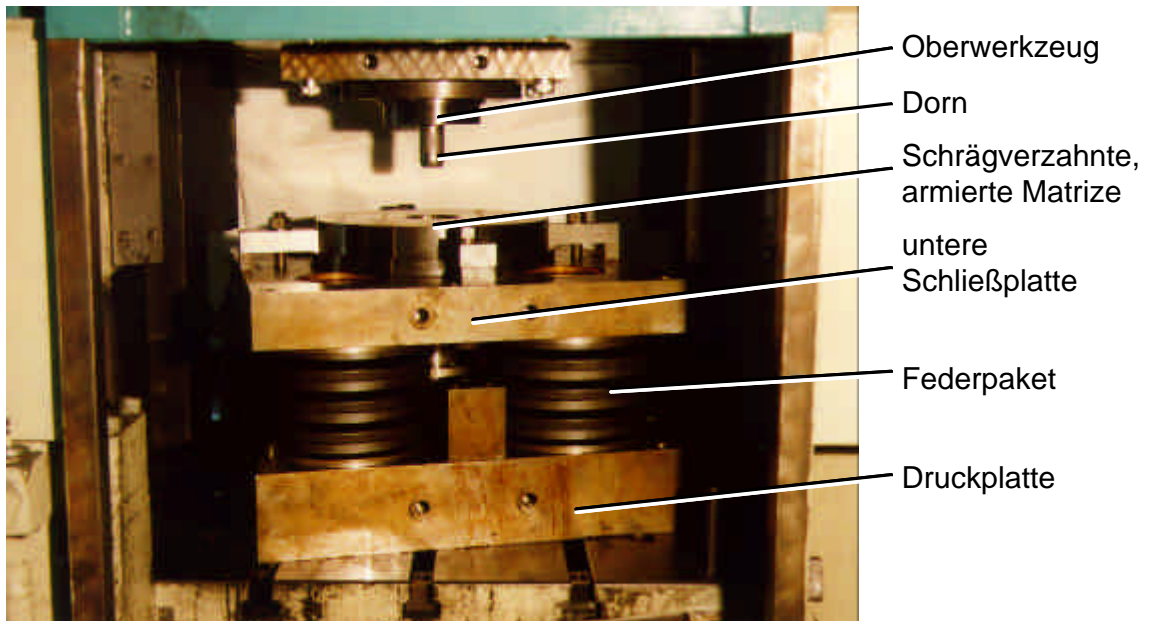


Bild 45: In Presse eingebautes Werkzeugsystem zum Gangrad Schmieden (erste Stufe)

Wie in den vorangehenden Abschnitten beschrieben, besteht das Bauteil aus verschiedenen Geometrieelementen, die unterschiedliche Anforderungen an den Umformprozess und an das Werkzeugsystem stellen. Die einzelnen Geometrien sind in **Bild 46** dargestellt.

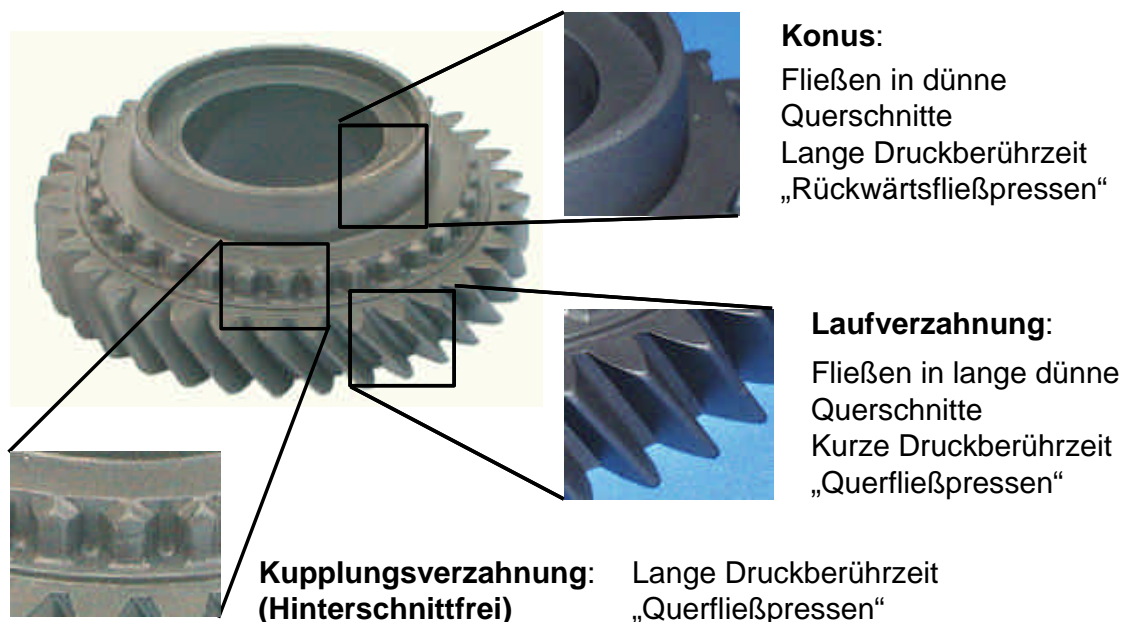


Bild 46: Unterschiedliche Geometrieelemente und deren Eigenschaften bei der Umformung in der ersten Stufe

Hieraus können für die Funktion des Werkzeugsystems der ersten Umformstufe folgende Bedingungen abgeleitet werden:

- Zeitliche Trennung von „Werkzeug schließen“ und „Umformen“,
- prozesssichere, reproduzierbare Positionierung von Obergesenk und Matrize zueinander,

- Vermeidung von Auffederungen der formgebenden Werkzeugelemente,
- Vermeidung von Einlegeungenauigkeiten,
- Ausstoßen des Bauteils ohne Beeinflussung der gefertigten Geometrien.

Die zeitliche Trennung der Teilschritte „Werkzeug schließen“ und „Umformen“ wird durch die Verwendung einer federnd lagernden Schließplatte und Matrize gewährleistet /9/. Die Federn realisieren ein Geschlossenhalten des Gesenks über den gesamten Umformvorgang. Die Schließkraft wird über die Kennlinien der Federn bestimmt. Diese Gegenkraft berechnet sich aus der augenblicklichen Kontaktfläche in Krafrichtung und der herrschenden Spannung im Werkstück. Nur wenn die Schließkraft größer ist als die Gegenkraft, ist es möglich, das Schmieden im quasigeschlossenem Gesenk durchzuführen. Um die exakte Bewegung der unteren Schließplatte zu gewährleisten, ist das gesamte Werkzeugsystem in ein Säulenführungsgestell integriert.

Die prozesssichere Positionierung der formgebenden Werkzeugelemente zueinander ist zur Einhaltung der geforderten Genauigkeiten zwingend erforderlich. Bei dem hier zur Anwendung kommenden System sind dies der Oberstempel, mit dem die Kupplungsverzahnung und der Anlaufkonus abgeformt wird und die schrägverzahnte Matrize, mit der die Laufverzahnung gefertigt wird. Die geforderte Genauigkeit des Bauteils kann nur dann erreicht werden, wenn bei den unterschiedlichen formgebenden Elementen die Lage der Werkzeuge zueinander exakt definiert ist. Ziel ist es, die Bauteilgenauigkeit nicht durch Addition verschiedener Toleranzen, bedingt durch unterschiedliche Bauteilfertigung, zu reduzieren. Aus diesem Grund wird ein einheitliches Bezugssystem für die formgebenden Elemente Matrize und Oberstempel gewählt. Dieses Bezugssystem ist definiert durch die Schließebene und die Werkzeugmittelachse. Alle fertigungsrelevanten Maße werden relativ hierzu ermittelt. Für die exakte Anordnung der Werkzeuge während der Umformung sorgen der Zentrierring und die Anschlagflächen von Matrize und Oberstempel. Während des Umformvorgangs taucht das Oberwerkzeug in den Zentrierring ein und wird somit zur Matrize zentriert. Durch die Kraftbeaufschlagung von Matrize und Obergesenk ist die Schließebene ebenfalls exakt definiert. Dieses Vorgehen ist in Bild 47 skizziert.

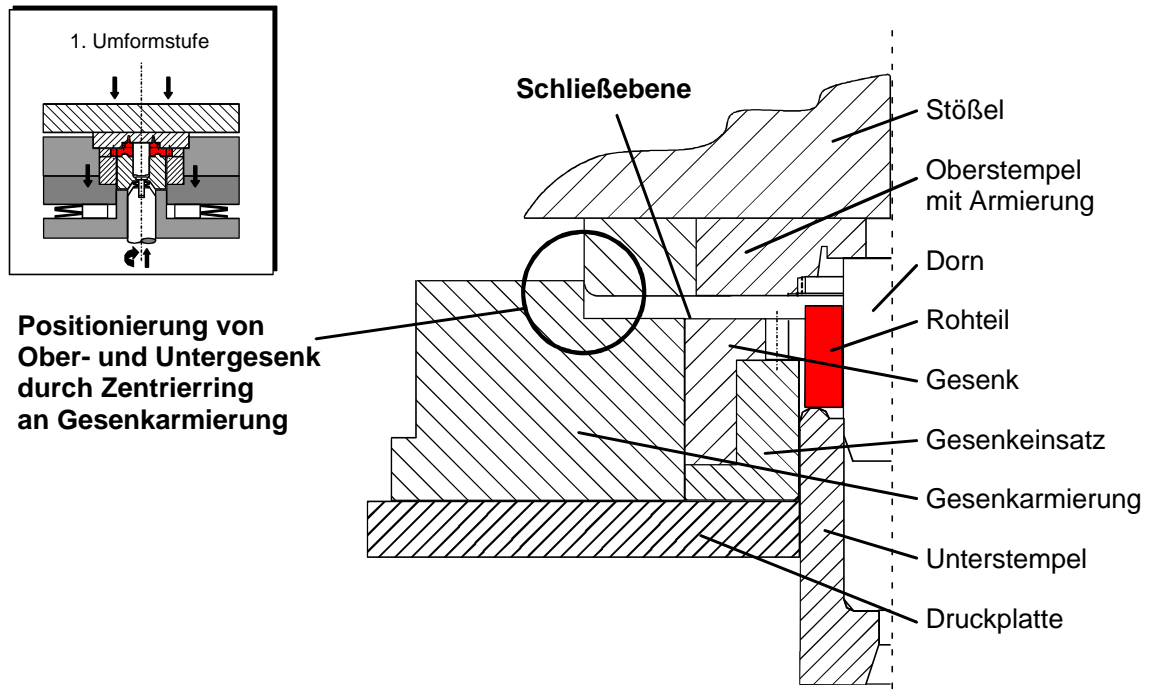


Bild 47: Positionierung der Werkzeugelemente Oberwerkzeug und Matrize zueinander

Zur Reduzierung der Aufweitung beim Umformprozess werden die Werkzeuge armiert, d. h. durch einen Werkzeugverbund vorgespannt (**Bild 48**). Diese Maßnahme ist notwendig, da in radialer Richtung eine Korrektur der Werkzeuggeometrie während der Umformung nicht möglich ist. Ein Nachregeln ist lediglich in Richtung der Stößelbewegung durch Verstellen des Verfahrensweges möglich.

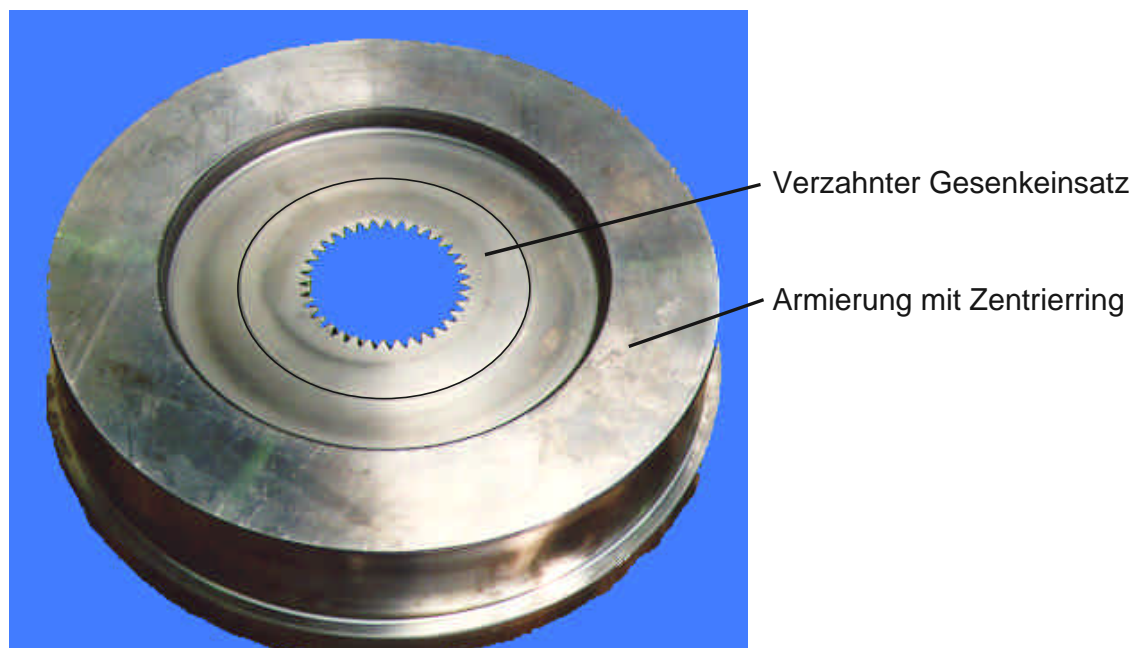


Bild 48: Armierte Matrize zur Reduzierung der Gesenkaufweitung beim Umformprozess

Die Einlegeposition hat ebenfalls Einfluss auf das Ergebnis der Umformung. Ein außermittig eingelegtes Rohteil führt zu ungleichmäßigem Stofffluss und damit zu unterschiedlicher Formfüllung der Gravur über den Umfang. Ein fehlerhaft positioniertes Rohteil kann außerdem zur Werkzeug- oder Maschinenbeschädigung führen. Zur exakten Positionierung des zylindrischen Rohteils muss bei dem Werkzeugsystem folgendes berücksichtigt werden:

1. Das Rohteil wird über seinen Außendurchmesser im Werkzeugsystem beim Einlegen vorzentriert.
2. Beim Herabfahren des Oberwerkzeugs wird das Rohteil durch den Dorn aufgefädelt, bevor der Dorn selbst zur Stabilisierung im Unterstempel aufgenommen wird.

Durch diese Vorkehrungen ist es möglich die Rohteile bei jedem Schmiedevorgang exakt zu positionieren.

Die schräge Laufverzahnung bedarf bei der Entnahme besonderer Beachtung, da durch deren hohen Schrägungswinkel ein Ausstoßen des Bauteils durch eine einfache, vertikale Bewegung des Ausstoßers zu Verformungen an der bereits fertig geschmiedeten Laufverzahnung führen würde (Bild 49).

Aus diesem Grund wurde bei diesem Werkzeug ein aktiv drehender Ausstoßer konzipiert, der die drehende Bewegung des Bauteils bei der Entnahme aus der Matrize unterstützt (Bild 50).

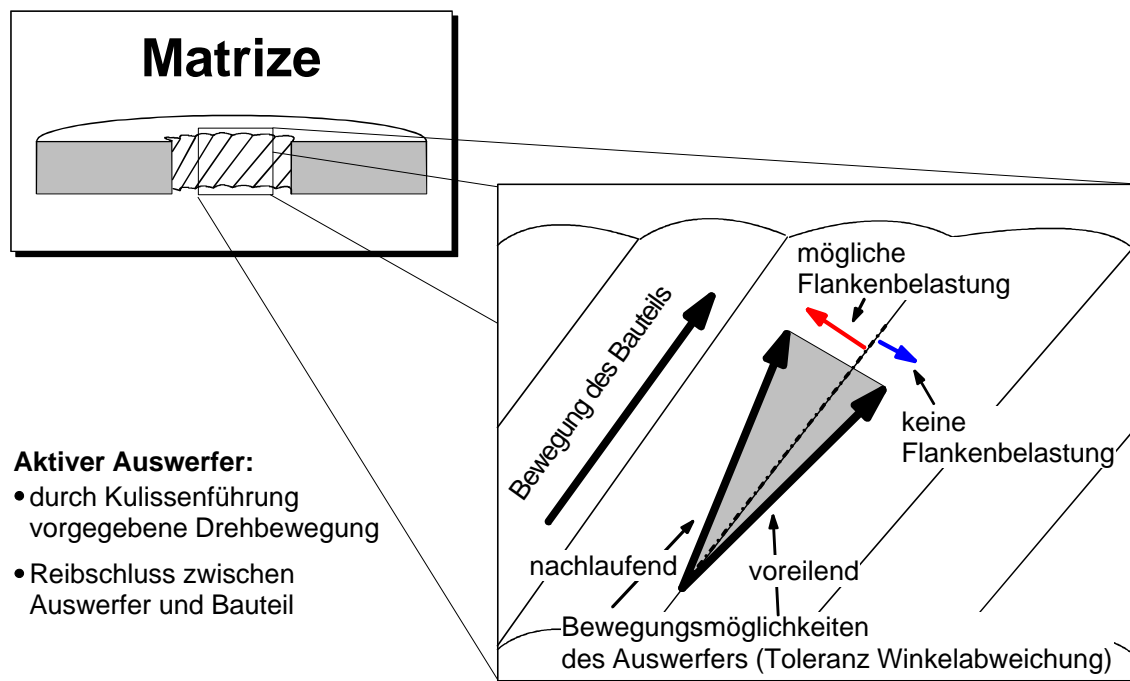


Bild 49: Prinzip der Zahnflankenbelastung während des Ausstoßvorgangs

Hierbei kann es bei einem nachlaufenden Ausstoßer zu einer Schädigung der Zahnflanken kommen, da das geschmiedete Bauteil beim Ausstoßen gegen die Matrize gedrückt wird, die somit belastet wird und damit geschädigt werden kann. Bei einem voreilenden Ausstoßer kann sich das Bauteil vom Ausstoßer trennen, da es lediglich durch sein Eigengewicht auf diesem gehalten wird. Die

Belastung der Matrize ist daher nicht so groß, dass eine Schädigung des Matrize allein durch den Ausstoßvorgang hervorgerufen wird.

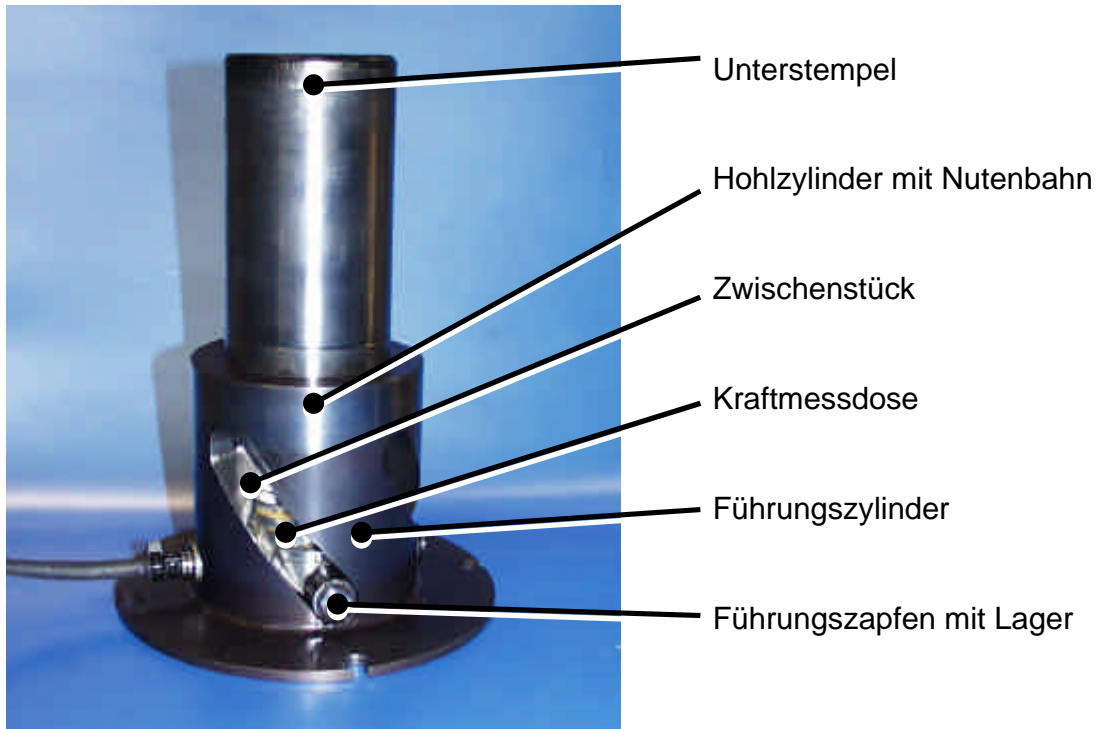


Bild 50: Aktives Auswerfersystem

Wirkungsweise des Werkzeugsystems (erste Stufe)

Die Abfolge der Teilschritte bei der Umformung des Bauteils in der ersten Umformstufe ist in **Bild 51** dargestellt.

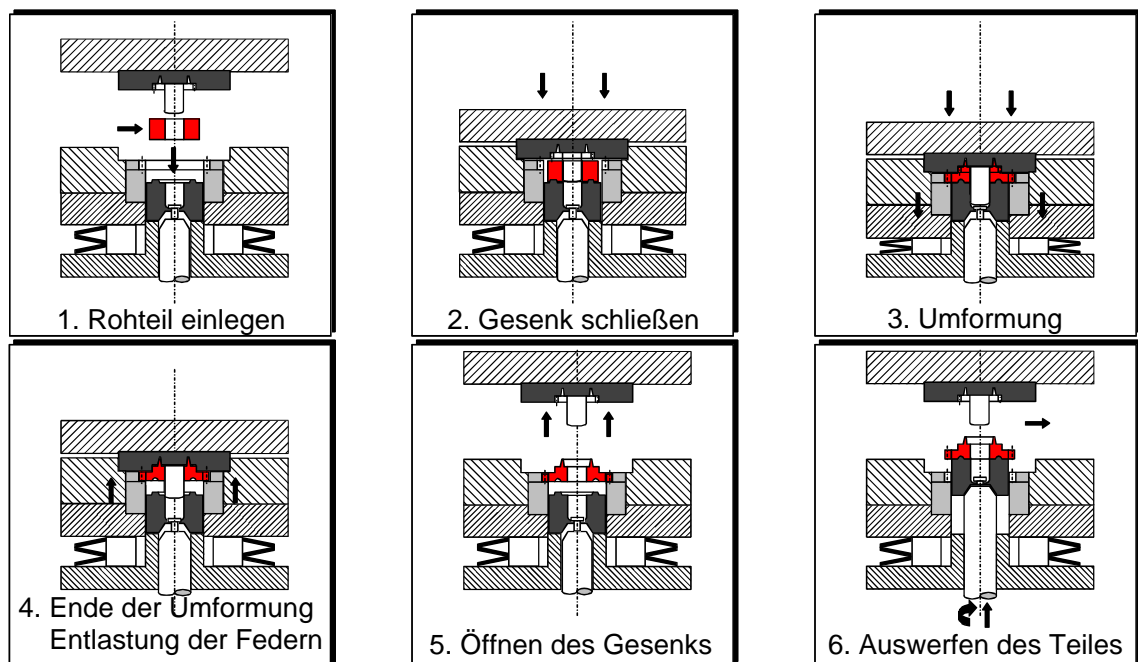


Bild 51: Abfolge der Teilschritte zur Fertigung eines Pkw-Gangrades (erste Umformstufe)

Hierbei gestaltet sich der Ablauf der Umformung wie folgt:

1. In das geöffnete Werkzeugsystem wird das Rohteil eingelegt. Das Rohteil ist dabei so ausgelegt, dass es im Gesenk durch entsprechend angeordnete Flächen vorzentriert wird.
2. Beim Herabfahren des Stößels wird das Rohteil durch den Dorn aufgenommen und somit exakt zentriert. Danach taucht der Dorn in den Unterstempel ein. Ab diesem Zeitpunkt wird der Dorn an beiden Enden geführt. Hierdurch wird ein Ausknicken des Dorns auf Grund von auftretenden Querkraften während der Umformung verhindert. Nachdem das Obergesenk auf die armierte Matrize auftrifft, kann von einem quasigeschlossenem Gesenk gesprochen werden.
3. Durch die weitere Abwärtsbewegung des Stößels wird das Obergesenk mit der unteren Schließplatte entgegen der aufzubringenden Federkraft nach unten bewegt. Die Schließkraft, die durch die Federn aufgebracht wird, sorgt hierbei für ein geschlossenes Gesenk während der Umformung. Der ortsfeste Unterstempel bewegt sich dabei relativ zu den anderen formgebenden Elementen aufwärts und führt somit die Umformung durch. Durch die Entkopplung der Funktionen „Werkzeug schließen“ und „Umformen“ ist das Schmieden ohne Grat möglich.
4. Nach Durchlaufen des „unteren Totpunktes“ des Stößels, an dem die Umformung abgeschlossen ist, bewegen sich Stößel, Obergesenk und auch die armierte Matrize nach oben. Die Federn werden entlastet. Das Bauteil wird in den formgebenden Elementen Oberwerkzeug und Matrize weiterhin gehalten. Lediglich der Unterstempel wird entformt.
5. Beim Erreichen der Ausgangslage der Schließplatte öffnet sich das Werkzeug. Das Bauteil wird dabei vom Oberwerkzeug entformt und in der schrägverzahnten Matrize gehalten.
6. Nachdem der Stößel wieder in die Ausgangslage („oberer Totpunkt“) zurückgekehrt ist, wird das Bauteil durch den Auswerfer mit einer aktiven Drehbewegung aus dem Werkzeug geführt. Die aktive Drehbewegung des Auswerfers sorgt dabei für eine möglichst geringe Belastung der bereits fertig geschmiedeten Laufverzahnung. Im Anschluss kann das auf dem Auswerfer liegende Bauteil entnommen werden.

Nach dem beschriebenen Umformprozess wird das Werkzeugsystem durch einen kombinierten Kühl-Schmiervorgang für den nächsten Schmiedevorgang vorbereitet.

6.1.3.2 Einbringung des Hinterschnitts in die Kupplungsverzahnungsgeometrie (zweite Umformstufe)

Aufbau des Werkzeugsystems (zweite Stufe)

Mit dem Werkzeugsystem der zweiten Umformstufe soll der Hinterschnitt in die in der ersten Umformstufe vorgeschmiedete Geometrie der Kupplungs-

verzahnung eingebracht werden. Dabei dürfen die bereits fertiggeschmiedeten Bauteilgeometrien, wie z. B. Laufverzahnung, Anlaufkonus und Bohrung, nicht negativ beeinflusst werden.

Dies hat zur Folge, dass die Krafteinleitung und die Wirkung der Kraft auf das Bauteil lokal begrenzt werden müssen. Somit können die in /29/ und /30/ dargestellten Verfahren nicht zum Einsatz kommen. Bei diesen Verfahren würde der Grundkörper der fertiggeschmiedeten Laufverzahnung mit hohen Kräften beaufschlagt. Dies würde zu unerwünschten Geometrieabweichungen führen.

Aus diesem Grund kommt ein segmentiertes Werkzeug zum Einsatz, dessen formgebende Elemente radial geteilt sind. Dies bewirkt, dass das hinter-schnittene Bauteil nach der Umformung bei geöffnetem Werkzeugsystem zerstörungsfrei entnommen werden kann.

In Bild 52 ist das Prinzip des Werkzeugsystems dargestellt. Die Segmente sind als Schieberelemente ausgeführt.

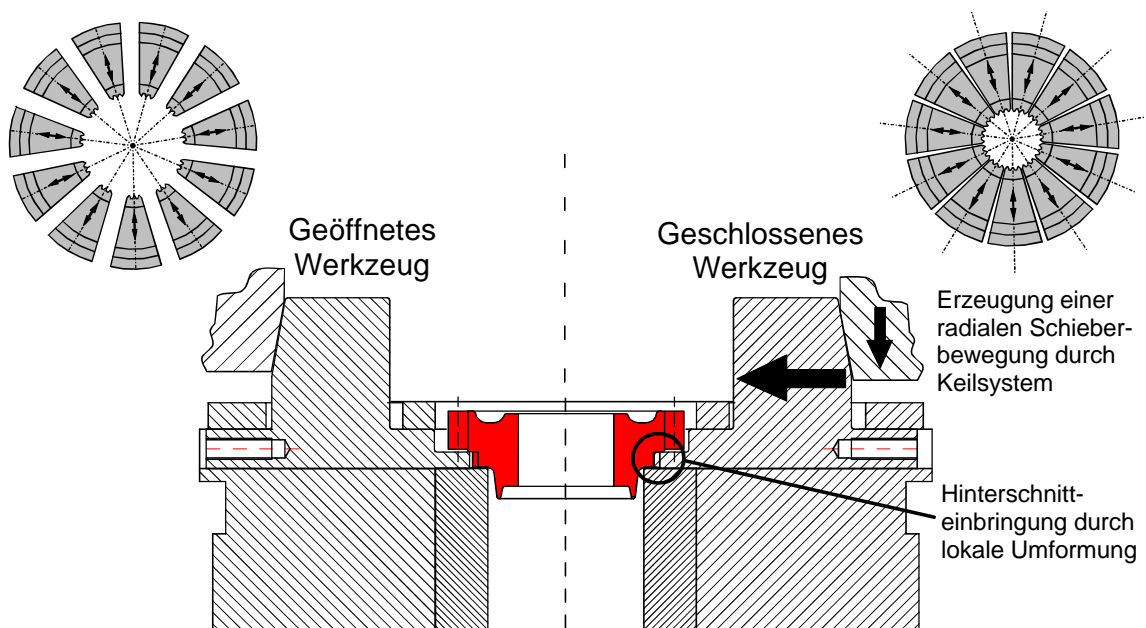


Bild 52: Schematische Darstellung des Werkzeugsystems (zweite Stufe)

Das Werkzeugsystem ist so aufgebaut, dass die vertikale Bewegung des Stößels in eine radiale Bewegung der Schieber umgesetzt wird. Hierfür wird die Bewegung der Schieber über ein Keilsystem eingeleitet. Die Begrenzung des Schieberweges kann durch unterschiedlich positionierte Anschläge erreicht werden. Die Positionierung wird in einen maschinenseitigen und einen werkzeugseitigen Anschlag unterteilt. Beide hier beschriebenen Werkzeugprinzipien werden im Folgenden untersucht. Die Prinzipien der Werkzeuge mit maschinen- und werkzeugseitigen Anschlägen sind in Bild 53 dargestellt.

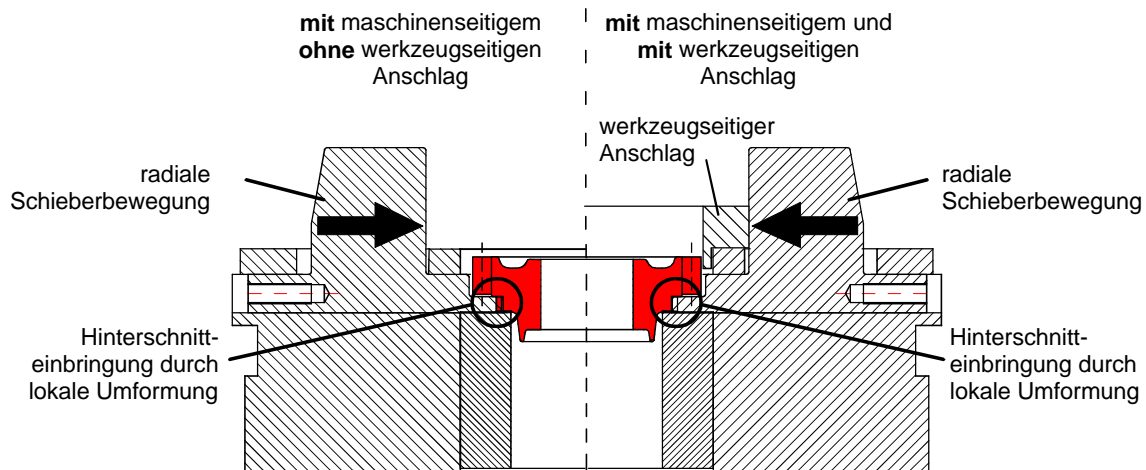


Bild 53: Werkzeugprinzip der zweiten Umformstufe mit und ohne werkzeugseitigem Anschlag

Zur Entkoppelung von der nicht reproduzierbaren Stößelendlage (UT) und der exakt geforderten Schieberstellung sind Elastomere auf den Keilen angebracht. Nach der Aufwärtsbewegung des Stößels werden die Schieber durch die Rückholfedern in die Ausgangsposition zurückbewegt und somit das Werkstück entformt.

Das in die am IFUM vorhandene Kupplungsspindelpresse eingebaute Werkzeug ist in Bild 54 dargestellt.

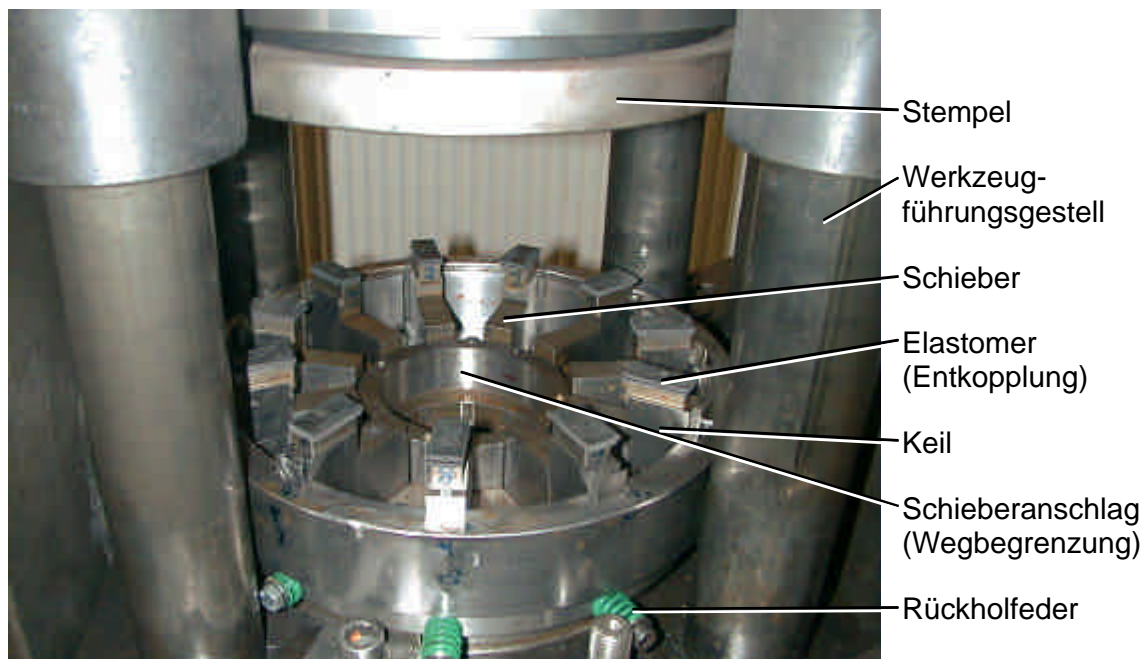


Bild 54: Werkzeugsystem zur Hinterschnitteinbringung (Pkw-Gangrad, zweite Stufe)

Der Hinterschnitt wird durch das Eindringen der Schieber lokal begrenzt in das Werkstück eingebracht. Es wird nur Material aus dem Bereich der Hinterschnidungen verdrängt. Die Vorform der ersten Umformstufe ist so ausgelegt, dass das zu verdrängende Material in Bereichen angelagert wird, die grob toleriert sind.

Die aktive Umformung durch die Schieber begrenzt den Kraftfluss auf die Umformzone. Anders als das bereits beschriebene, patentierte Verfahren /29/30/ wird die Umformkraft hier nicht horizontal durch das Bauteil geleitet, sondern radial auf den Bereich der Kupplungsverzahnung begrenzt eingebracht. Hierdurch wird eine Sekundärverformung des Bauteils in den Bereichen, die bereits fertig geschmiedet sind, auf ein Minimum reduziert.

Das Bauteil wird beim Einlegen über die Kombination von Kupplungsverzahnung und Schieber vorzentriert. Die Matrize, in der die Form des Dachs abgebildet wird, ist für die Feinausrichtung zuständig. In Bild 55 wird die Geometrie der formgebenden Elemente detailliert aufgezeigt.

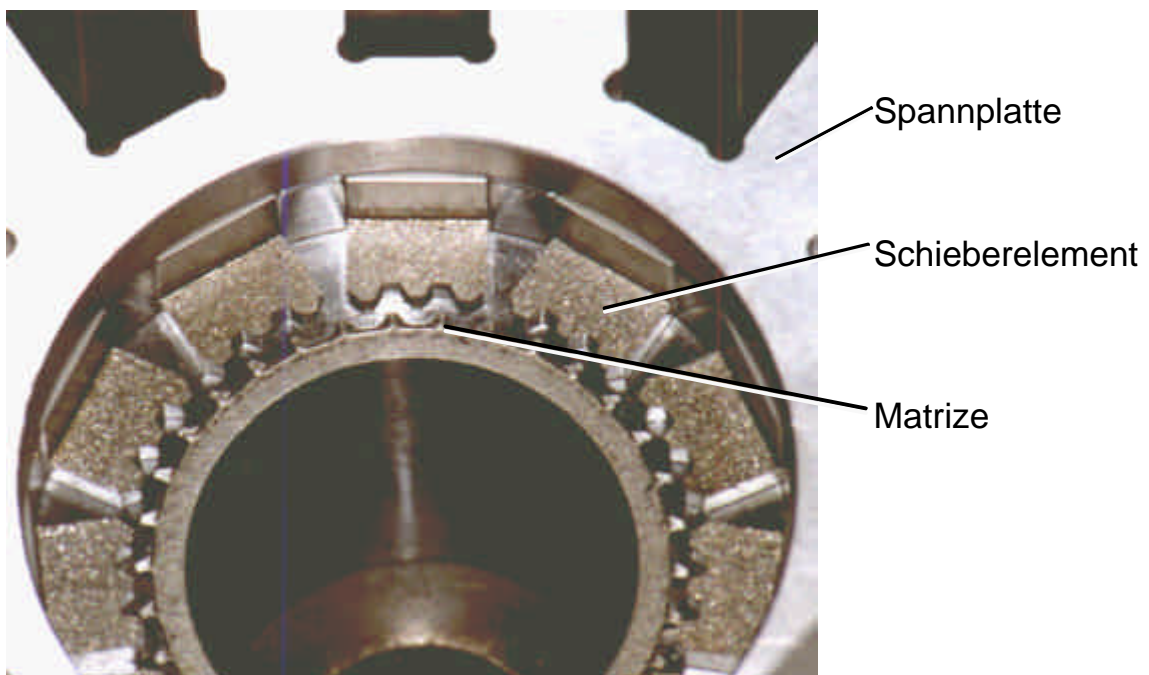


Bild 55: Werkzeugsystem der zweiten Umformstufe (Detailansicht)

Die in der ersten Umformstufe vorgeschmiedete Geometrie der Kupplungsverzahnung kann durch die lokal begrenzte Umformung auf den Bereich der Zahnflanken keine Geometrieoptimierungen im Bereich der Dachkantenradien ausüben. Hierfür wären sehr viel größere Umformkräfte notwendig, die im Gegenzug die Geometrien der Laufverzahnungen beeinflussen würden.

Wirkungsweise des Werkzeugsystems (zweite Stufe)

Die Hinterschnitteinbringung in der zweiten Umformstufe erfolgt in der Abfolge der Teilschritte, die in Bild 56 dargestellt sind.

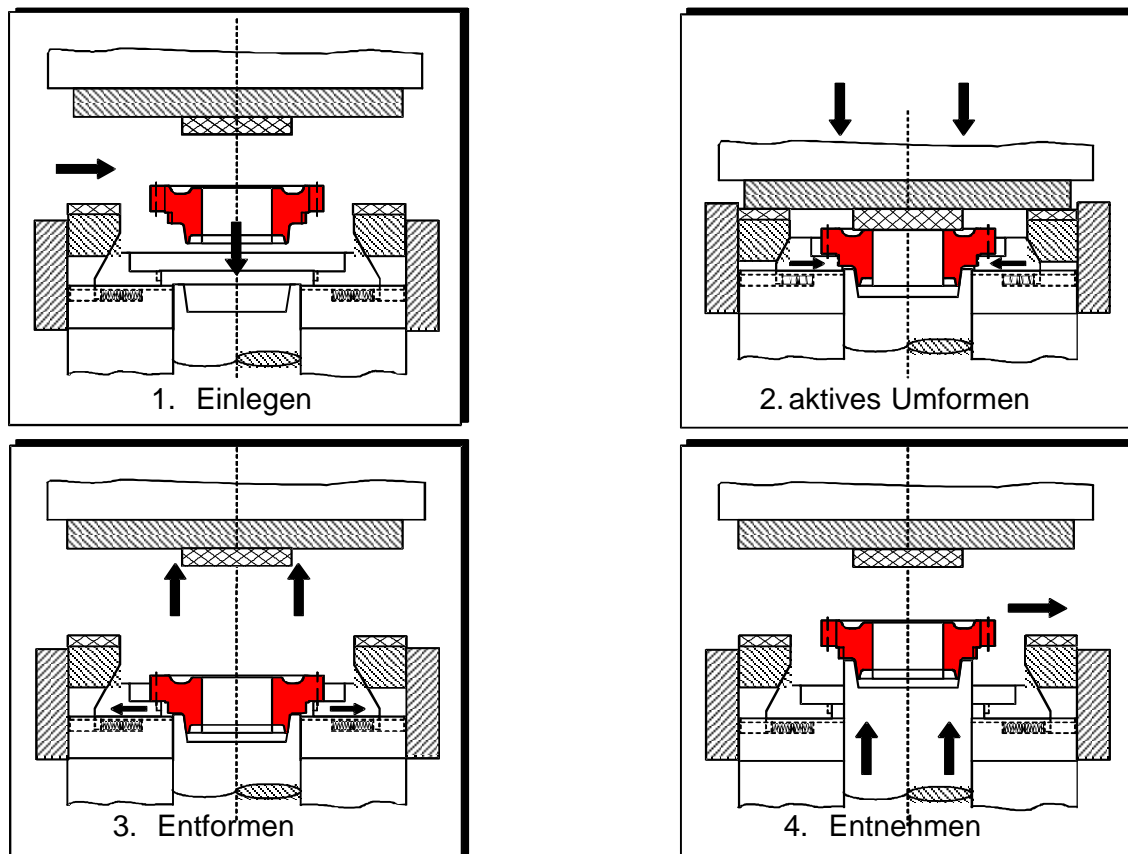


Bild 56: Abfolge der Teilschritte zur Erzeugung des Hinterschnitts
(zweite Umformstufe)

Der Ablauf der Hinterschnitteinbringung gestaltet sich wie folgt:

1. Das Fertigteil der ersten Umformstufe wird in das geöffnete Werkzeug eingelegt. Die Schieberelemente lassen hierbei die Positionierung des Bauteils nur in der richtigen Lage zu. Über die Kupplungsdächer und die Matrize wird das Bauteil in die richtige Höhen- und Winkellage gebracht.
2. Das Herabfahren des Stößels bewirkt, dass die Schieberelemente mit Hilfe von Keilen radial zusammen gefahren werden. Durch das Eindringen der Schieberelemente in die vorgeschmiedeten Kupplungszähne wird das Material so umgeformt, dass sich der Hinterschnitt an den Bauteilen abbildet. Die Endlage der Schieber wird hierbei durch Anschläge begrenzt. Somit ist sichergestellt, dass die Schieberelemente nicht zu tief in das Werkstück eindringen und Verformungen an bereits fertig geformten Flächen hervorrufen.

Für die Entkoppelung der Bewegungen von Maschinenstößel und Werkzeugschiebern sind Elastomere auf den Keilen des Werkzeuges angebracht. Diese Elastomere sorgen für die Entkopplung von Kraft und Weg bei der Schieberbewegung, so dass keine Zwangsbewegung der Schieber durch die Stößelbewegung der Maschine vorhanden ist. Hierdurch wird die Reproduzierbarkeit der Hinterschnitteinbringung erhöht und Werkzeugbruch durch zu starkes Eindringen der Schieber vermieden.

3. Nach dem Umformen bewegt sich der Stößel wieder zum oberen Umkehrpunkt. Die Schieber werden durch Federelemente in ihre geöffnete Ausgangslage bewegt. Das Bauteil liegt somit frei im Werkzeug.
4. Das hinterschnittene Bauteil wird bei geöffnetem Werkzeug entnommen.

Nach der Umformung in der zweiten Stufe werden die Bauteile unter Sauerstoffabschluss langsam abgekühlt, um eine Verzunderung nach der Umformoperation zu vermeiden. Alternativ hierzu ist eine direkte Übergabe an eine angeschlossene Wärmebehandlung möglich.

6.1.3.3 Finite – Elemente - Methode Simulation der Umformung

Für die Prozessauslegung von Präzisionsschmiedeprozessen ist die Finite-Element-Methode (FEM) ein geeignetes Mittel, um im Vorfeld der Versuche Aussagen zum Prozessverhalten zu bekommen. Hierdurch ist es möglich, Änderungen in den Aufbau des Verfahrens einzubringen, bevor das Werkzeugsystem gebaut, bzw. der Fertigungsprozess auf den Maschinen installiert wird. Dies führt zu einer kürzeren Entwicklungszeit und somit zu einem günstigeren Entwicklungsprozess. Im folgenden sind die FEM-Simulationen der Umformprozesse der ersten und zweiten Umformstufe dargestellt.

FEM-Simulation der ersten Umformstufe

Für ein genaueres Verständnis der Vorgänge während der Umformung hinsichtlich des Formfüllverhaltens, der Temperaturverteilung nach der Umformung sowie der Vorformermittlung, wurde eine dreidimensionale Finite-Elemente-Simulation des Schmiedeprozesses durchgeführt. Hierfür wurde ein FE-Modell realisiert, welches einen Segmentwinkel von $82,3^\circ$ abdeckt. In Bild 57 ist das verwendete Modell als Explosionsdarstellung und im Zustand unmittelbar vor Beginn der Umformung dargestellt.

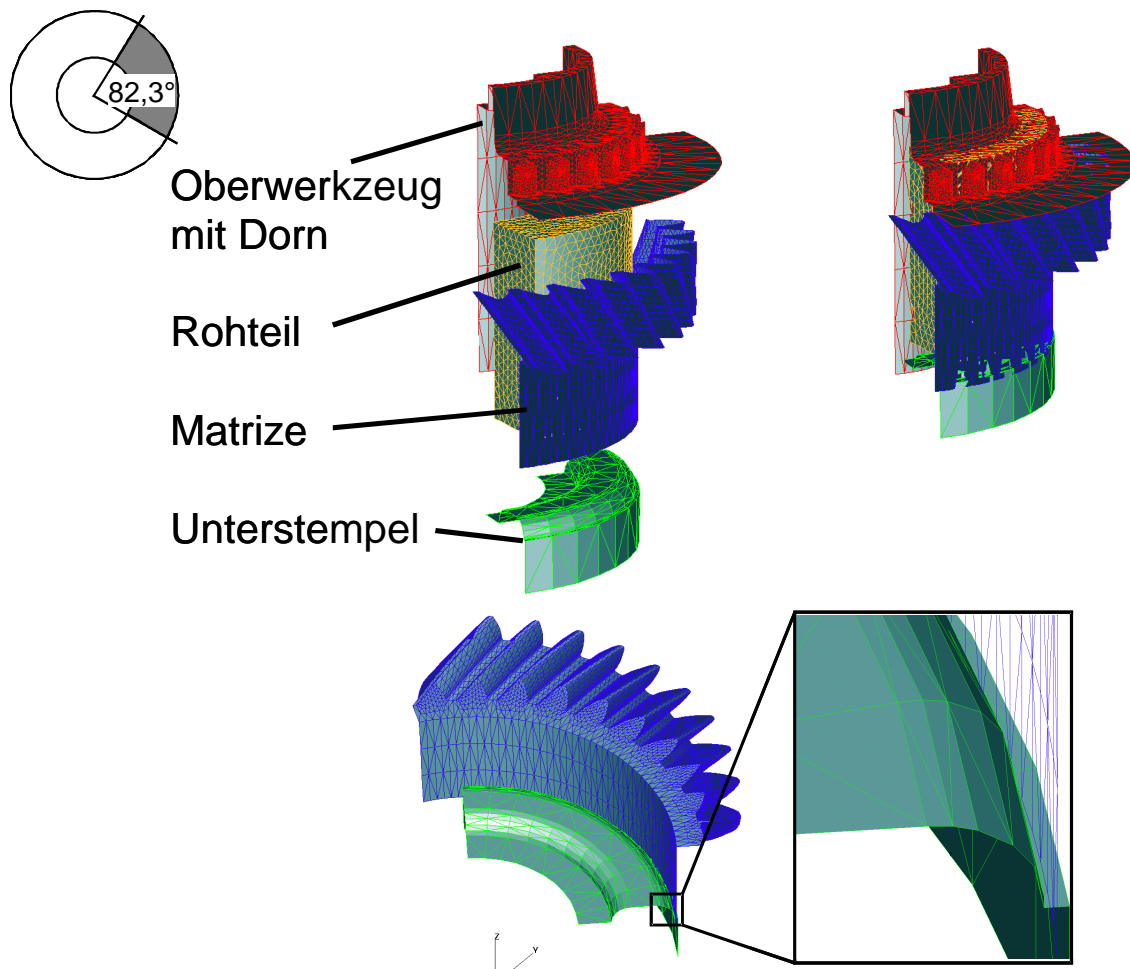


Bild 57: Simulationsmodell mit Modellierungsdetail (nach /57/)

Die Abbildung zeigt, dass die Modellierung der Werkzeugelemente analog zur Anordnung im Versuchswerkzeug erfolgt ist, d. h. Oberstempel und Dorn, Matrize mit Laufverzahnung sowie Unterstempel bilden topologisch zusammenhängende Oberflächen.

In dem verwendeten Simulationsmodell besitzen die Werkzeuge keine physikalischen Eigenschaften, d.h. sie wurden als starre flächenhafte Werkzeuge ausgeführt, so dass weder Deformation infolge der mechanischen Belastung noch Erwärmung infolge Wärmeübergang mit dem Werkstückwerkstoff berücksichtigt werden. Damit verhalten sich die Werkzeuge bei der Berechnung ideal starr. Der Wärmeübergang vom Schmiedestück in das Werkzeug wurde mit Hilfe eines konstanten Wärmeübergangskoeffizienten definiert.

Besondere Aufmerksamkeit benötigt die Modellierung des Unterstempels. In der Werkzeugkonstruktion läuft die Stirnfläche des Stempels mit einer Verrundungsfläche in der Mantelfläche aus. Damit bildet sich im geschlossenen Werkzeug ein umlaufender, keilförmiger Spalt (vgl. [Bild 57](#)), der sich bis auf den radialen Spalt zwischen Matrize und Unterstempel reduziert. Für eine FE-Modellierung ist diese Anordnung aufgrund der endlichen Größe der finiten Elemente sowie der numerischen Ungenauigkeiten bei der Kontaktfindung äußerst ungünstig, so dass die Unterstempelgeometrie für das Simulations-

modell gemäß der Detailvergrößerung in [Bild 57](#) verändert wurde. Mit der veränderten Geometrie ist sichergestellt, dass die Hohlform im Rahmen der Rechengenauigkeit vollständig geschlossen ist.

Mit dem beschriebenen Modell erfolgte die Simulation des Umformprozesses. Vereinfachend wurde von einer konstanten Vorformtemperatur von $T_0 = 1270 \text{ °C}$ ausgegangen.

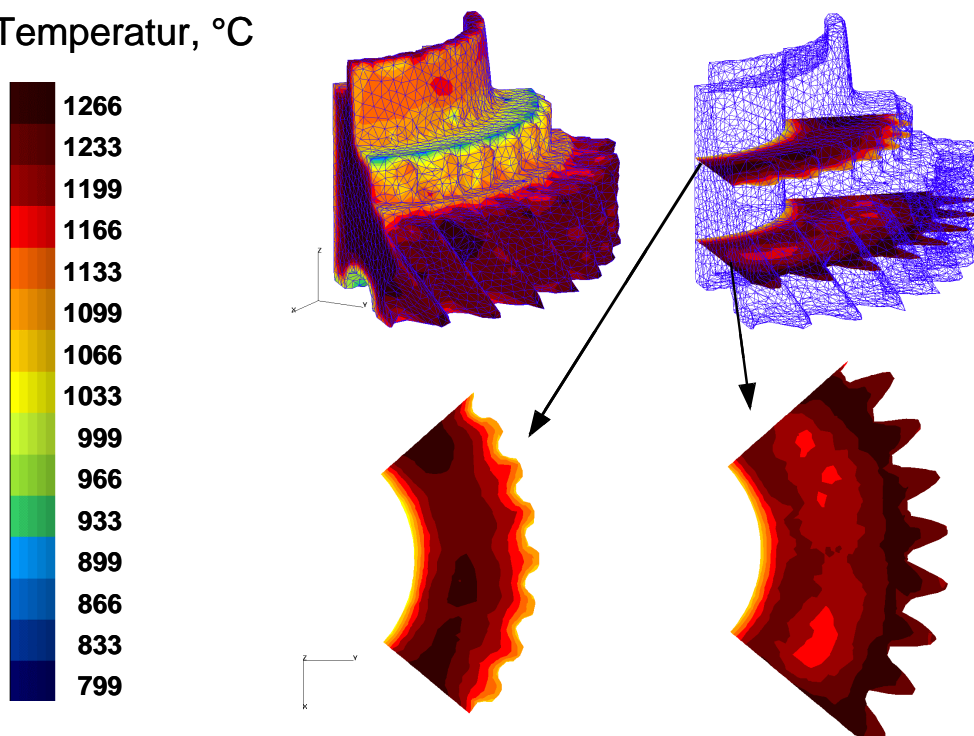
Wesentliche Zustandsgrößen zur Beurteilung der Umformvorgänge stellen die gezeigten

- Verteilungen von Temperatur ([Bild 58](#)) und
- Vergleichsformänderung ([Bild 59](#))

in der Endform dar.

Hinsichtlich der Temperaturverteilung kann festgestellt werden, dass insbesondere im Bereich der Kupplungsverzahnung eine deutliche Abkühlung der oberflächennahen Bereiche erfolgt. Aufgrund des geringen Anteils des Kupplungszahnvolumens am Gesamtvolumen des Gangrads stellt sich zwischen Zahnkopf und Zahnfuß nur eine geringe Temperaturdifferenz ein.

Temperatur, °C



[Bild 58](#): Temperaturverteilung am Ende der Umformung (nach /57)

Auch die Temperaturverteilung in der Laufverzahnung weist nur einen geringen Gradienten in radialer Richtung auf, obwohl durch die verschiedenen Kontaktzeiten unterschiedliche Wärmeübergänge zwischen den Kontaktpartnern vorherrschen. Als mögliche Erklärung können die hohen Umformgrade im Zahnfuß (vgl. [Bild 59](#)) angeführt werden, die in diesem Bereich durch die

Dissipation innerer und äußerer Arbeit als Wärmequelle fungieren und damit den Wärmeübergang in das Werkzeug annähernd kompensieren.

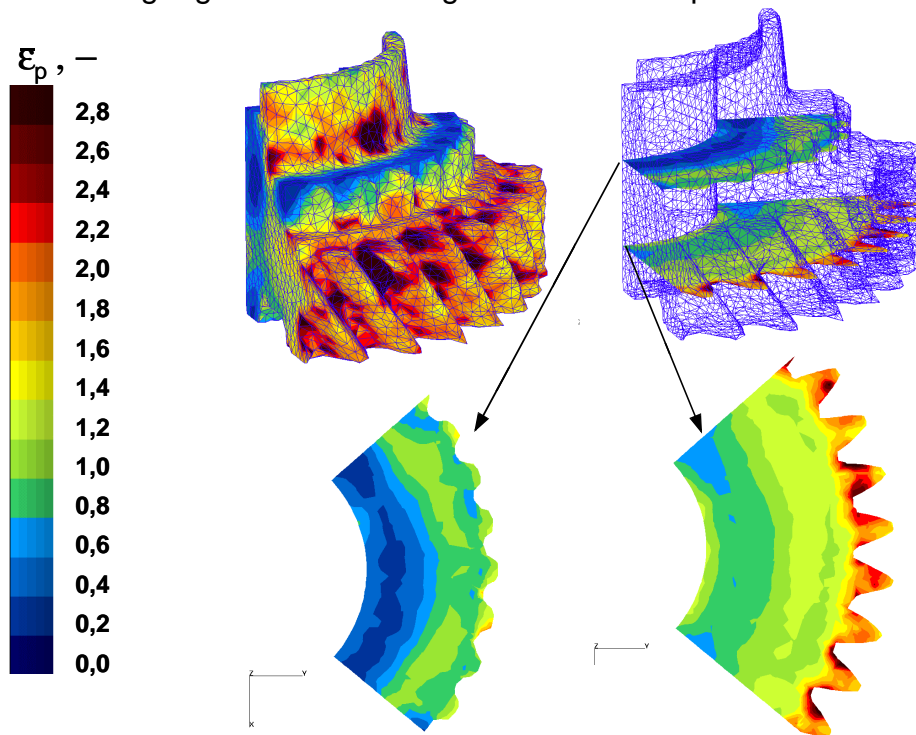


Bild 59: Berechnete Formänderungsverteilung (nach /57/)

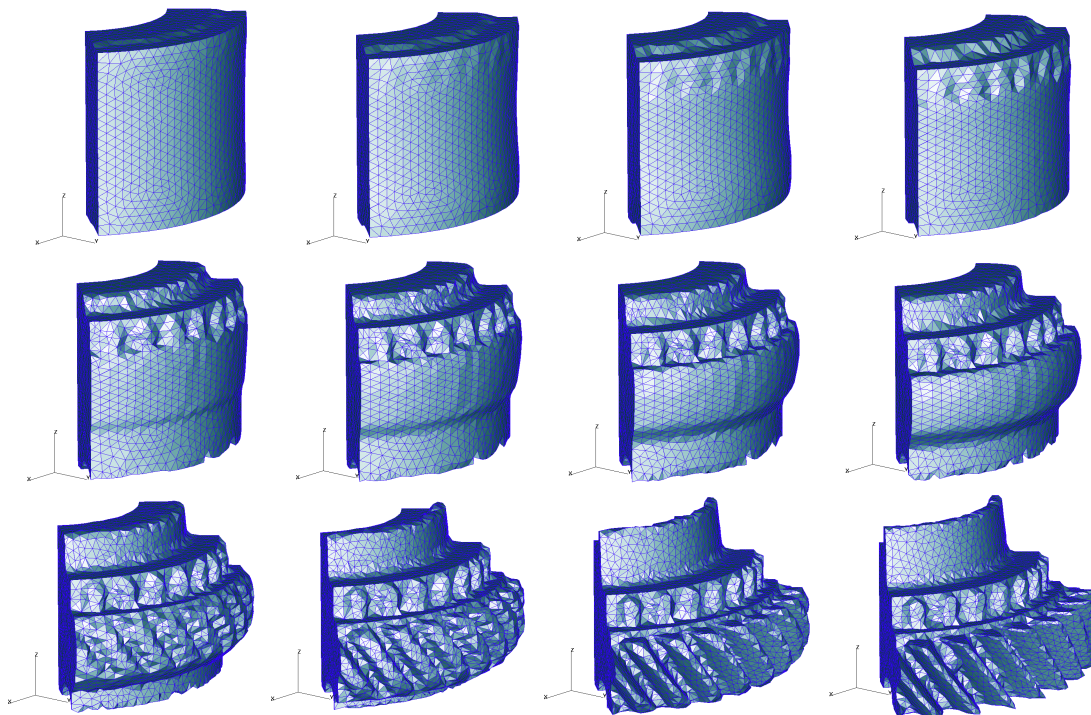


Bild 60: Visualisierung der Formfüllung der ersten Umformstufe (nach /57/)

Bild 60 zeigt die Deformation des Werkstücks zu verschiedenen Zeitpunkten während der Umformung. Es ist zu erkennen, dass bereits während der beginnenden Ausbauchung der Probe auch eine teilweise Ausformung der

Kupplungszähne erfolgt. Durch den mit einsetzender Ausformung der Laufverzahnung steigenden Innendruck werden die Kupplungszähne vollständig gefüllt, und der Werkstoff beginnt in die schmale stirnseitige Rippe zu fließen. Am Ende der Simulation stehen alle Knotenpunkte der Oberfläche in Kontakt zu den Werkzeugflächen, so dass für das Simulationsmodell eine vollständige Formfüllung erreicht wird.

Bild 61 zeigt die an den Segmenten der drei Werkzeugelemente berechneten Kräfte, aufgetragen über den Umformweg. Deutlich zu erkennen ist, dass die Kraft im letzten Viertel der Umformung signifikant ansteigt, was auf den hohen Formänderungswiderstand bei der Ausformung der Laufverzahnung zurückzuführen ist. Die maximale Kraft der Umformung bei Präzisions-schmiedeprozessen kann aus der Simulation nur grob abgeleitet werden, da das Kriterium für eine exakte Formfüllung und somit das Ende des Umformprozesses nicht genau festgelegt werden kann. Zudem steigt der Kraftbedarf bei der Umformung zum Ende des Prozesses stark an, so dass es hierdurch zu Ungenauigkeiten kommen kann.

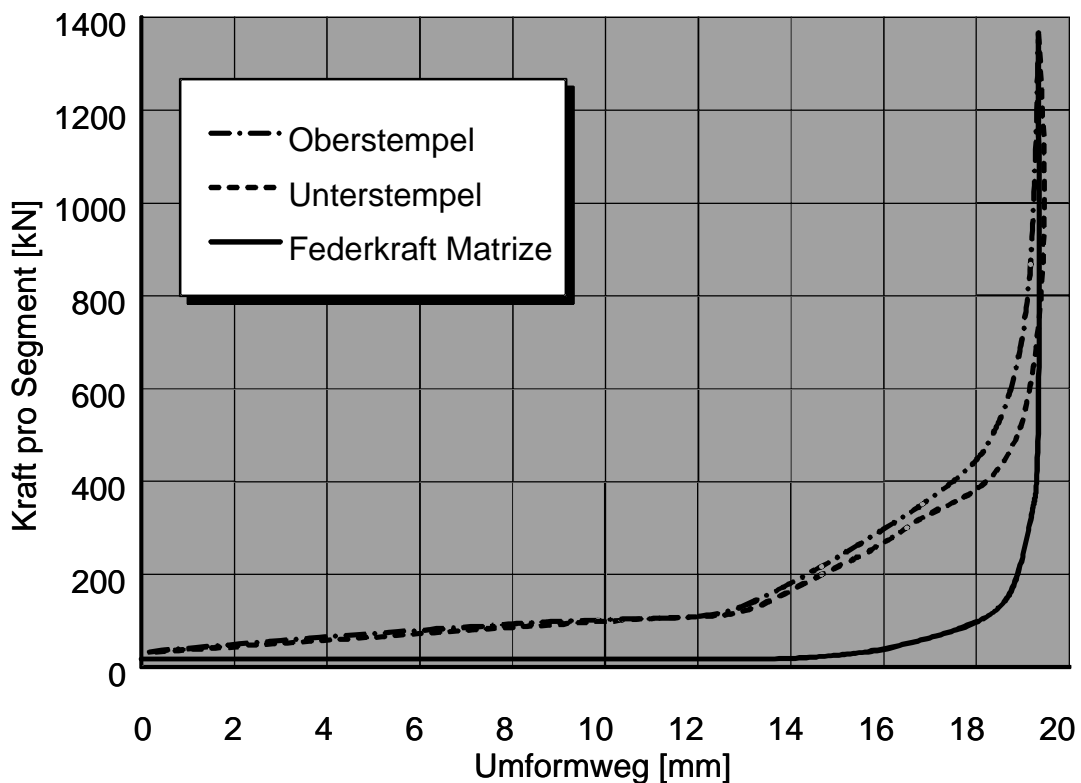


Bild 61: Berechneter Kraft-Weg-Verlauf von Oberstempel, Matrize und Unterstempel (nach /57/)

Mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode konnte die Vorformauslegung vereinfacht werden. Hierbei wurden verschiedene Geometrien berechnet. Als Vorformgeometrie wurde schließlich ein einfacher Rohrabschnitt gewählt, der in der gezeigten Berechnung zum Einsatz kam. In Bild 62 ist der Verlauf der Formfüllung während des Umformprozesses zu verschiedenen Zeitpunkten zu erkennen.

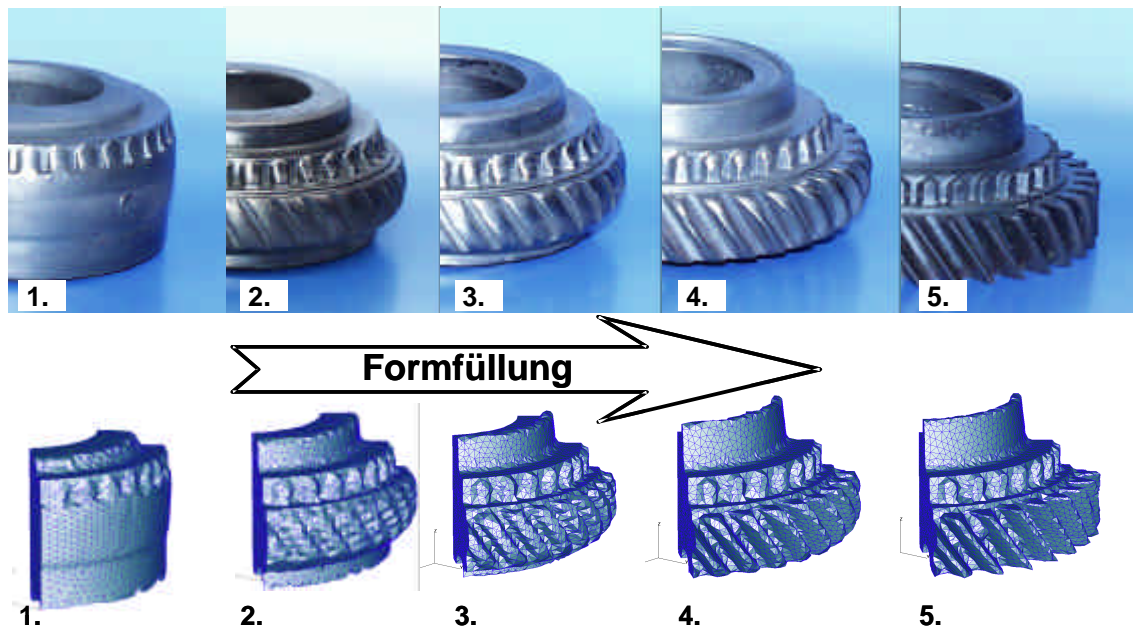


Bild 62: Gegenüberstellung der Formfüllung von Realprozess und Simulation

Der Vergleich von Simulation und durchgeführten Versuchen zeigt eine gute Übereinstimmung. Dies bedeutet, dass die Genauigkeit der Simulation des Pkw-Gangrads sehr hoch ist. Die Simulation zeigt ein detailgetreues Abbild der Realität.

FEM-Simulation der zweiten Umformstufe

Ziel der FEM-Simulation für die Schmiedeversuche der zweiten Umformstufe ist die Bestimmung einer geeigneten Schiebergeometrie zur Einbringung der Hinterschnitte in die Kupplungszähne.

In der zweiten Umformstufe wird der benötigte Hinterschnitt an den Kupplungszähnen durch eine Kalibrieroperation eingebracht. Hierfür sind Schieberelemente vorgesehen, die von außen radial eine partielle Umformung der Flanken der Kupplungszähne durchführen.

Für die Modellbildung wurde von der Werkzeugkonzeption der zweiten Umformstufe ausgegangen. Im Interesse einer feinen Diskretisierung des Umformbereiches bei gleichzeitig akzeptablen Rechenzeiten waren verschiedene Vereinfachungen bzw. Annahmen notwendig. Es wurde daher der Bereich eines Kupplungszahnes aus dem gesamten Gangrad herausgeschnitten (**Bild 67**) und mit geeigneten Randbedingungen versehen. Die Betrachtung nur eines Kupplungszahnes ist durch die gleichmäßige Verteilung der Kupplungszähne auf dem Umfang und durch die Annahme, dass kein Werkstofffluss quer zur Schnittfläche stattfindet, zulässig. Die Bereiche der Laufverzahnung und des Anlaufkonuses werden nicht berücksichtigt. Die nachfolgenden Simulationen bestätigen die Zulässigkeit dieser Vereinfachung, da die jeweils angrenzenden Bereiche deutlich außerhalb der auftretenden plastischen Formänderung liegen. Die Vereinfachung in radialer Richtung durch ein starres Innenteil ist aufgrund vergleichender Simulationsrechnungen im Vorfeld der Untersuchungen ebenso zulässig, wie die Reduzierung des

Schiebers auf ein Zahnsegment, das senkrecht zum Bauteil verfahren wird. Ein solches Teilstück für die Simulation der Hinterschnitterzeugung ist in Bild 63 dargestellt.

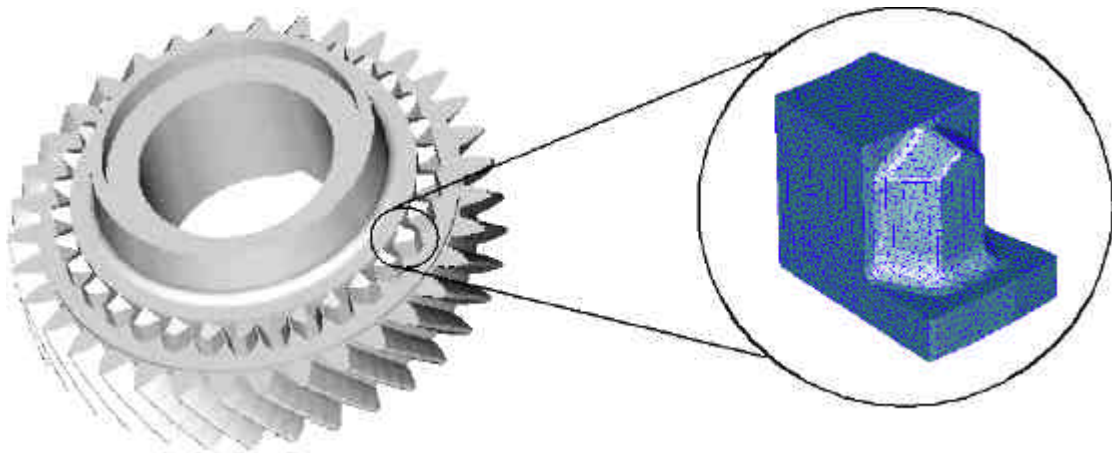


Bild 63: Teilstück für die Simulation der Hinterschnitterzeugung

Das Werkzeugkonzept, das für die Simulation der Hinterschnitterzeugung zum Einsatz kommt, besteht aus den Teilen Matrize, Schieber sowie starrem Innenteil (Bild 64).

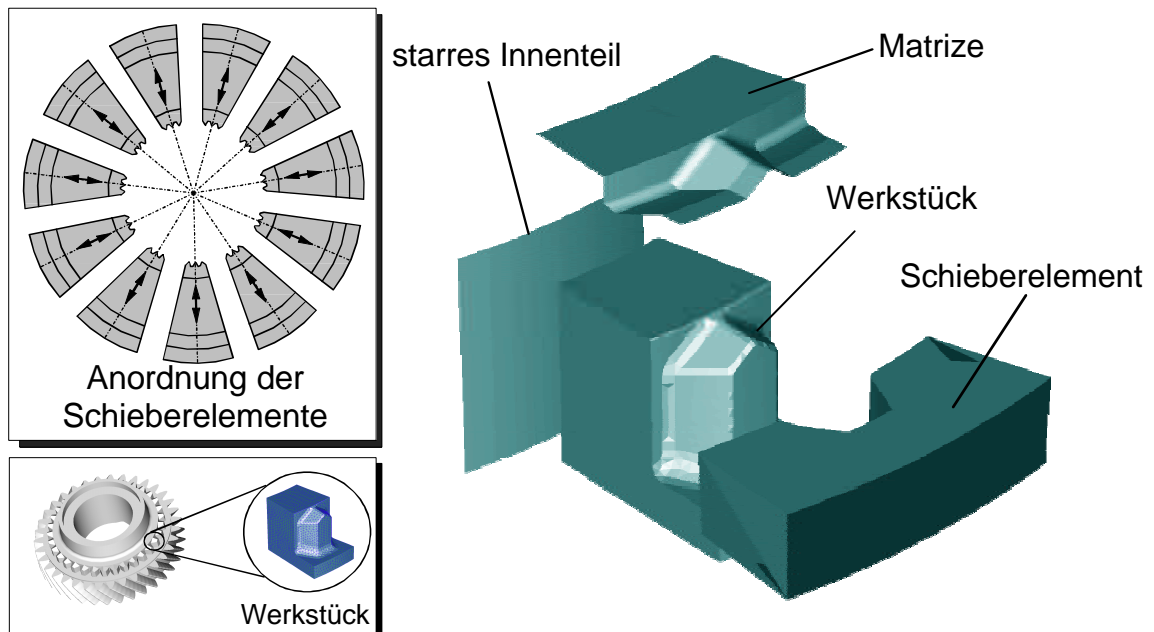


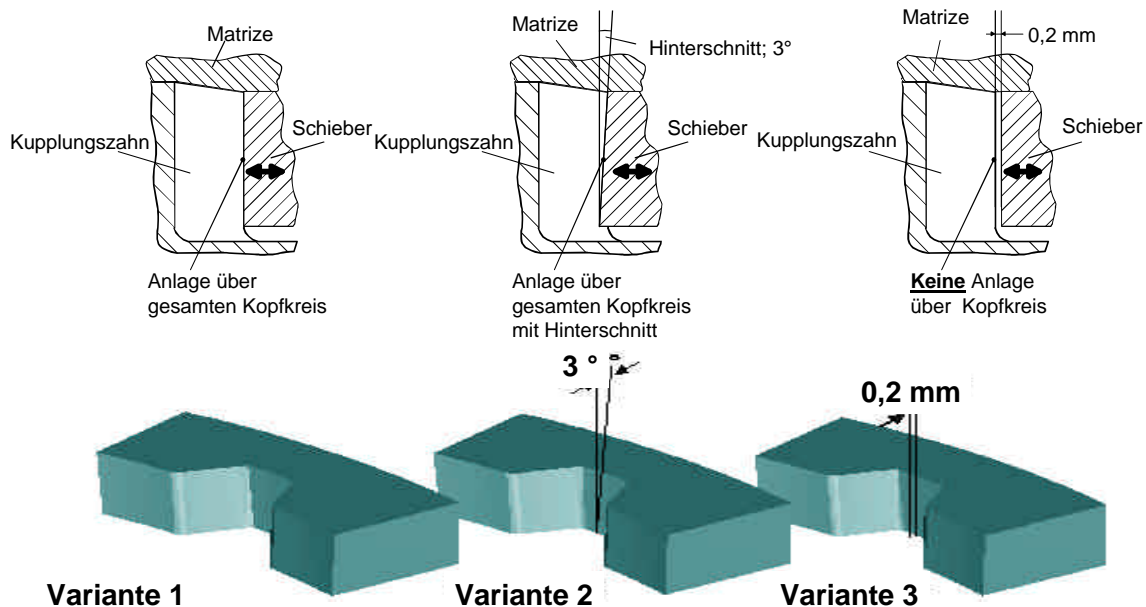
Bild 64: Werkzeugaufbau für die Simulation der Hinterschnitterzeugung

Die Bauteile haben folgende Funktionen:

- Die Matrize bildet die Dachform des Kupplungszahnes ab. Wichtig ist hierbei die exakte Ausformung der Dachkante, die beim Schaltvorgang den fehlerfreien Eingriff der Schalmuffe gewährleistet,
- Das Schieberelement bildet die Profilform der Kupplungszähne mit Hinterschnitt ab. Durch die Schieberbewegung findet die Einbringung des Hinterschnittes in die Kupplungszähne statt.

- Das starre Innenteil, das bei dem realen Werkzeugsystem nicht existiert, verhindert in der Simulation die Verschiebung des Segmentes in radialer Richtung. Bei der realen Umformung ist das Bauteil dickwandiger, so dass eine Verformung in radialer Richtung vernachlässigt werden kann.

Für die Simulation wurde das Programm Forge3 der Firma Transvalor verwendet. Mit Hilfe der Simulation wurden drei Schiebergeometrien untersucht, die in [Bild 65](#) dargestellt sind.



[Bild 65](#): Geometrievariation der Schieber

Die Eigenschaften der Varianten sind im Folgenden aufgeführt:

- Variante 1) Werkzeugsystem **mit Anlage** der Schieber im Kopfkreis des Zahnes am Ende der Umformung
- Variante 2) Werkzeugsystem **mit teilweise hinterschnittener Anlage** der Schieber im Kopfkreis des Zahnes am Ende der Umformung
- Variante 3) Werkzeugsystem **ohne Anlage** der Schieber im Kopfkreis des Zahnes am Ende der Umformung

Die berechnete plastische Vergleichsformänderung bei Verwendung unterschiedlicher Schiebergeometrien ist in [Bild 66](#) dargestellt.

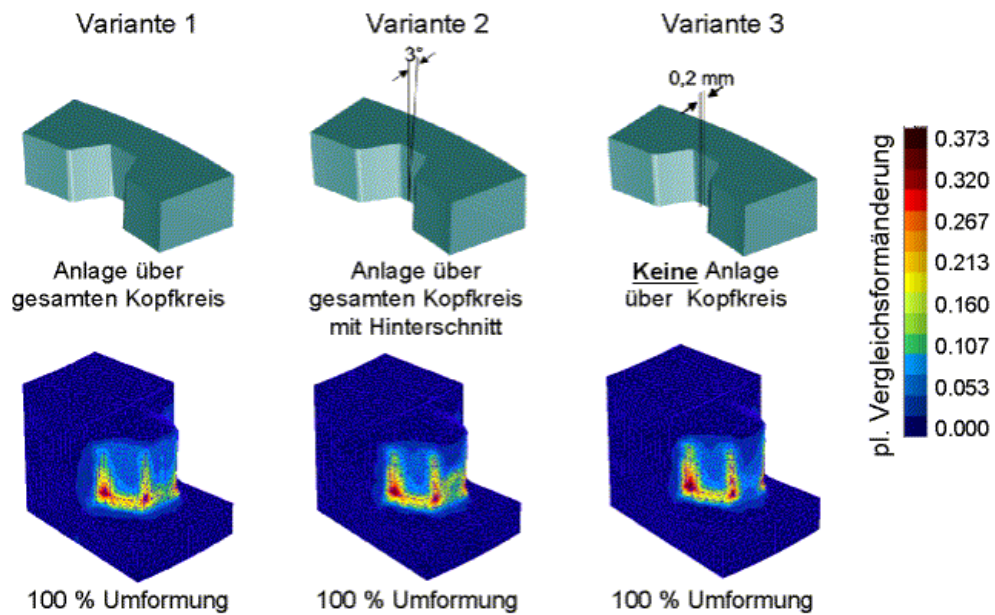


Bild 66: Simulationsergebnisse der Hinterschnitterzeugung verschiedener Schiebergeometrien

Variante 1

Die Simulation mit vollständiger Anlage im Kopfbereich der Kupplungsverzahnung ergab eine Formänderung, die zum überwiegenden Teil im Bereich des Kupplungszahnes auftritt (**Bild 67**). Dies ist in der Darstellung der Vergleichsformänderung über dem Umformvorgang zu erkennen. Sobald die Schiebergeometrie am Kopfkreisdurchmesser der Kupplungszähne Kontakt zum Bauteil hat (100 % Umformung), wirkt sich diese auf den unteren Bereich des Segmentes aus. Die Simulation ergibt, dass sich der Werkstofffluss in den Bereich des Zahnradgrundkörpers fortsetzt. Mögliche, zu erwartende Verschiebungen im Bereich der Grenzfläche zur Laufverzahnung liegen hierbei im Bereich unter 15 µm.

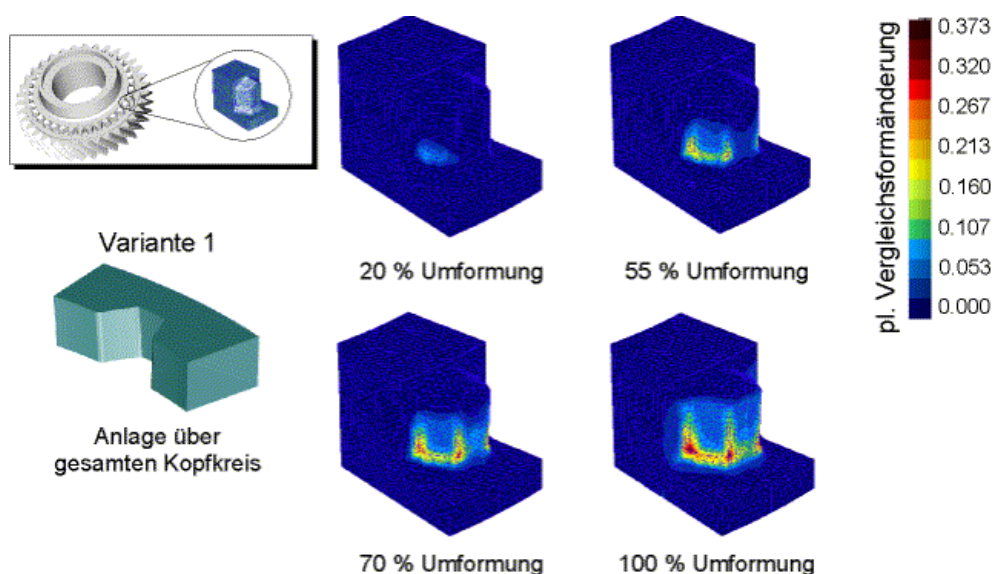


Bild 67: Simulationsergebnisse zur Hinterschnitterzeugung (plastische Vergleichsformänderung) über den Umformvorgang

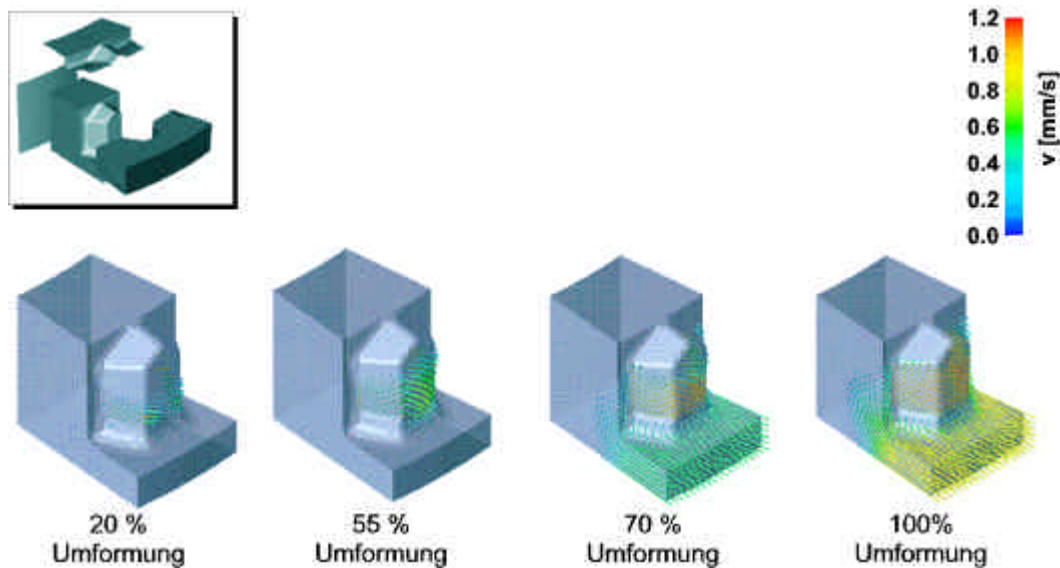


Bild 68: Simulation des Werkstoffflusses bei der Hinterschnitterzeugung (Variante 1)

Der in **Bild 68** dargestellte Verlauf des Werkstoffflusses zeigt, dass ein Stofffluss des Materials im Bereich des Grundkörpers erst gegen Ende der Umformung stattfindet. Darüber hinaus ist der Betrag des Werkstoffflusses sehr gering. Es findet hierbei keine plastische Verformung der Bauteilgeometrie im Bereich der Laufverzahnung statt.

Variante 2

Bei dieser Variation der Schiebergeometrie wurde eine teilweise hinterschnittene Anlagefläche im Bereich des Kopfkreises vorgenommen. Durch diesen Hinterschnitt (3°) sollte der Stofffluß während der Umformung in den Bereich der Matrizenanlagenebene gelenkt werden, um die Geometrieabweichungen im Bereich der Laufverzahnung zu minimieren. Die FEM-Simulation dieser Variante zeigt aber, dass es nicht zu der gewünschten, gerichteten Materialverschiebung kommt. Nach dem teilweisen Anlegen der schrägen Anlage im Kopfbereich kommt es zu der gleichen Materialbewegung wie bei Variante 1. Die zu erwartenden Verschiebungen im Bereich der Grenzflächen zur Laufverzahnung liegen etwas unterhalb der Werte von Variante 1 (unter $10\ \mu\text{m}$).

Variante 3

Ausgehend von den Simulationsergebnissen der ersten beiden Varianten wurde in einem dritten Schritt die Schiebergeometrie im Bereich des Kupplungszahnkopfes so ausgelegt, dass dort kein Werkzeugkontakt auftritt. Es zeigt sich, dass der Werkstofffluss ungehindert in den Zahnkopfbereich erfolgen kann. Die sich aus der Simulation ergebenden Werte für die erwartete Verschiebung im Bereich der Grenzfläche zur Laufverzahnung liegt hier bei ca. $5\ \mu\text{m}$. Die Geometrieabweichung im Bereich des Zahnkopfes der Kupplungsverzahnung liegen bei ca. $50\ \mu\text{m}$. Dies ergibt eine Geometrieänderung des Kopfkreisdurchmessers der Kupplungsverzahnung von

100 μm , welche im Toleranzbereich (200 μm) liegt. Diese Abweichung tritt darüber hinaus lediglich im Anschlussradius an die Laufverzahnung auf. Bei der spanenden Herstellungsvariante befindet sich in diesem Bereich eine Nut für den Werkzeugauslauf.

Als Ergebnis der FEM-Simulationen ist festzuhalten, dass bei allen drei Varianten zur umformtechnischen Einbringung des Hinterschnittes die plastische Verformung auf den unmittelbaren Bereich des Kupplungszahnes beschränkt bleibt. Die Hinterschnitteinbringung wird am geringsten durch die Geometrie der Variante 3 beeinflusst. Hierbei kommt es zu Abweichungen im Bereich des Zahnkopfes, die jedoch innerhalb der Fertigungstoleranz liegen. Der Druckspannungszustand während der Umformung führt zu einer rechnerischen Ausbauchung der Grenzfläche zur Laufverzahnung. Dies wird durch elastische Deformation des Grundkörpers während der Umformung kompensiert. Für die schmiedetechnischen Untersuchungen wird Variante 1 gewählt, da hierbei sichergestellt wird, dass die Geometrie der Kupplungsverzahnung vollständig durch formgebende Werkzeuge abgebildet wird.

Aufgrund der Tatsache, dass bei der Simulation idealisierte Werkzeugverschiebungen angenommen wurden, ist keine Bewertung der Werkzeugausführung (mit oder ohne werkzeugseitigen Anschlag) möglich.

6.2 Experimentelle Untersuchungen zum Präzisionsschmieden von Pkw-Gangrädern

Aufbauend auf Ergebnissen zum Präzisionsschmieden von Zahnrädern aus vorangegangenen Arbeiten am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen /6/10/11/ wurden im Rahmen dieser Arbeit experimentelle Untersuchungen zur umformtechnischen Herstellung eines komplexen Pkw-Gangrades durchgeführt. In diesem Abschnitt wird der dafür notwendige Versuchsaufbau, die Ermittlung der relevanten Prozessparameter und die Durchführung der Versuche beschrieben.

6.2.1 Beschreibung des Versuchsaufbaus

Ausgehend von einer Prozesskette, in deren Mittelpunkt das Präzisionsschmieden steht (Bild 36, Seite 45), wurde für die Versuche der umformtechnische Abschnitt der Prozesskette betrachtet. Bei der Herstellung der Bauteile wurde im Versuchsbetrieb auf eine automatisierte Handhabung der Teile verzichtet.

Für den Versuchsbetrieb wurden folgende Vereinfachungen getroffen:

- Die Geometrie der Rohteile wurde durch Zerspanen hergestellt (volumengenau),
- die Erwärmung der Rohteile erfolgte in einem Kammerofen. Hierbei wurden die Rohteile in Wärmeschutzbehältern erwärmt, um ein Verzundern der Rohteile bei einer Erwärmungsdauer von 25 min zu vermeiden,

- die Handhabung der Teile erfolgte manuell,
- die Bauteile wurden nach der Umformung weitgehend unter Sauerstoffabschluss in Sand abgelegt.

Die verwendete Prozesskette für die Untersuchungen ist in Bild 69 zu sehen.

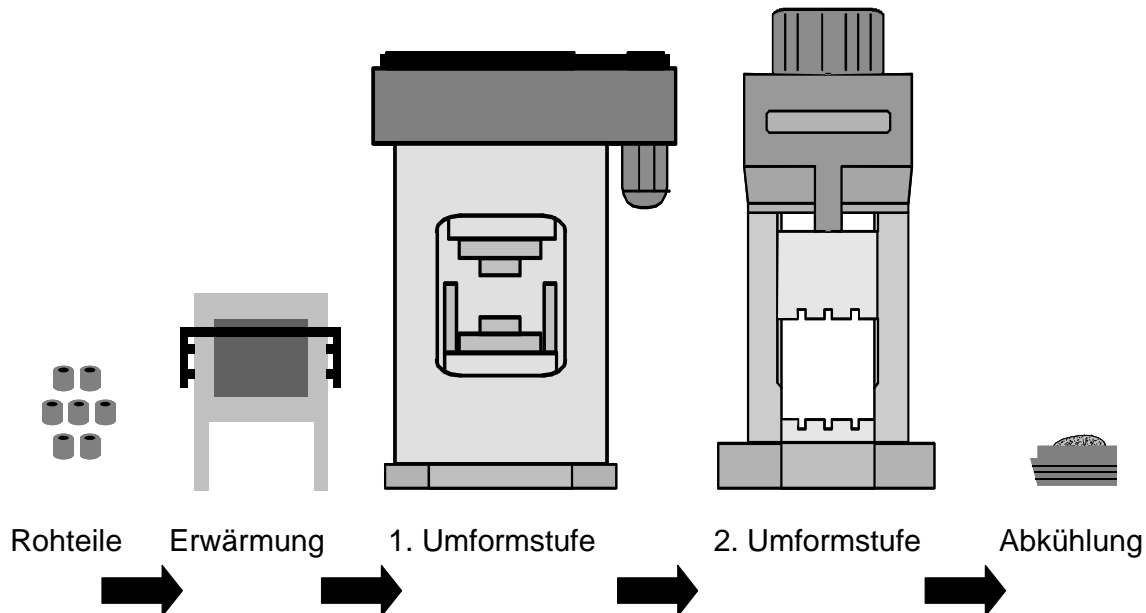


Bild 69: Prozesskette zum Präzisionsschmieden von Gangrädern

Während der Fertigung der Bauteile wurden wesentliche Größen des Umformprozesses aufgezeichnet.

- Die Massen der Rohteile wurden vor der Erwärmung ermittelt,
- die Erwärmungstemperatur konnte mit Hilfe der Ofensteuerung in einem Temperaturbereich von $\pm 5 \text{ °C}$ gehalten werden.

Für den Massivumformvorgang in der ersten Umformstufe wurden ebenfalls charakteristische Größen mit Hilfe von Sensoren erfasst und an einen Messrechner übergeben. Relevante Größen sind

- Stößelweg, Matrizenweg,
- Ausstoßerweg,
- Gestellkraft,
- Unterstempelkraft und
- Ausstoßerkraft.

Mittels dieser Prozessgrößen kann der Umformprozess umfassend analysiert werden.

Durch die bei der lokalen Umformung sehr geringe auftretenden Kräfte, verbunden mit den sehr großen Störeinflüssen, wie z. B. Reibung der Schieber und Kippung des Stößels, wurde auf eine Aufnahme der Messgrößen verzichtet.

Die Versuche wurden auf zwei am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen vorhandenen Spindelpressen durchgeführt (Bild 70). Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen an die beiden Umformstufen wurden zwei Maschinen für die Fertigung gewählt. Für die erste Umformstufe kam eine Kupplungsspindelpresse mit einer Nennkraft von 8000 kN zum Einsatz. Für die anschließende Hinterschnitteinbringung wurde eine direkt-angetriebene Spindelpresse mit einer Nennkraft von 2500 kN genutzt.

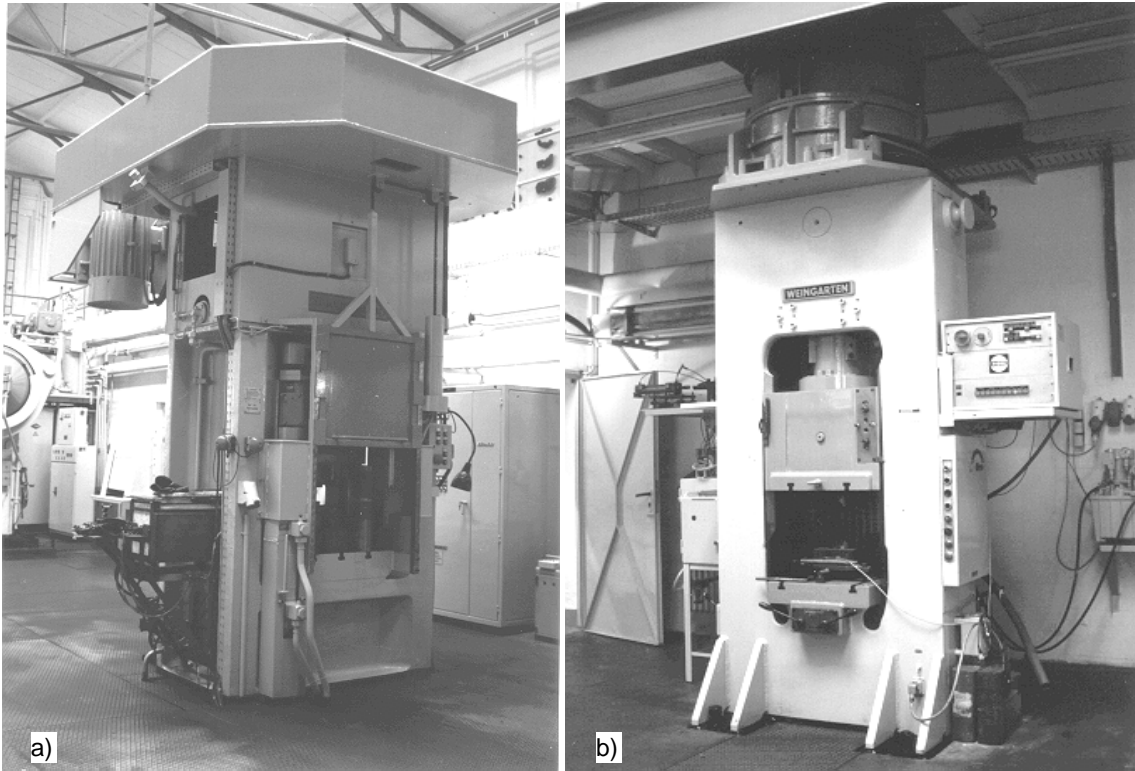


Bild 70: a) Kupplungsspindelpresse (8000 kN); erste Umformstufe
b) Spindelschlagpresse (2500 kN); zweite Umformstufe

6.2.2 Einflussgrößen des Umformprozesses

Bei den Einflussgrößen auf den Umformprozess unterscheidet man in Einstellgrößen und resultierende Größen. Einstellgrößen sind die Größen, auf die direkt durch Änderungen an den Umformmaschinen und Nebenaggregaten Einfluss genommen werden kann, z. B. Stößelgeschwindigkeit und Rohteiltemperatur. Die resultierenden Größen sind die Größen, die durch andere Prozessparameter beeinflusst werden und nicht direkt einstellbar sind, z. B. maximale Umformkraft. Sie resultieren aus den Wirkungen von Einstellgrößen und ihren Wechselwirkungen untereinander.

Als relevante Einflussgrößen zur Ermittlung der optimalen Prozessparameter können nur solche Größen herangezogen werden, die aktiv verändert und gezielt eingestellt werden können.

In Tabelle 7 sind Kenngrößen von Präzisionsschmiedeprozessen mit den daraus resultierenden Wechselwirkungen dargestellt.

Tabelle 7: Kenngrößen und ihre Einflussgrößen beim Präzisionsschmiedeprozess nach /6/

Kenngröße	hat Einfluss auf	wird beeinflusst durch	Einstellbar
Rohteilmasse	Einsatzvolumen		direkt
Rohteiltemperatur	Einsatzvolumen, Schrumpfung, Fließspannung		direkt
Werkzeuggrundtemperatur	Gravurvolumen, Wärmeübertragung von Rohteil und Gesenk		direkt
Stößelgeschwindigkeit	Fließverhalten, Umformgeschwindigkeit, Fließspannung		direkt
Energie der Presse	Umformvermögen		direkt
Maximale Umformkraft	Formfüllung	Energie der Presse, Fließspannung,	
Zeitintegral des Umformkraft-Zeit-Verlaufs	Umformvermögen	Energie der Presse, Werkzeugkonzept	
Maximalkraft im Pressengestell	Auffederung im Gestell	Energie der Presse	
Maximale Ausstoßerkraft	Mögliche Sekundärverformung fertiggeschmiedeter Verzahnungen	Gesenkauffederung, Bauteilschrumpfung, Schmierung im Gesenk	

Aus Tabelle 7 ist zu entnehmen, dass die Größen Rohteilmasse, Rohteiltemperatur, Werkzeuggrundtemperatur, Stößelgeschwindigkeit und die Energie der Presse direkt einstellbar sind.

Dies bedeutet, dass ausschließlich diese Parameter bei der Untersuchung von Präzisionsschmiedeprozessen gezielt verändert werden und somit für einen vollfaktoriellen Versuchsplan zur Ermittlung des Einflusses dieser Parameter auf die Bauteilqualität herangezogen werden können.

Aufgrund der Tatsache, dass volumengenaue Rohteile eine Grundvoraussetzung für das Präzisionsschmieden sind, wurde dieser Parameter bei

allen Versuchen konstant gehalten. Des Weiteren wurde die Werkzeuggrundtemperatur konstant gehalten. Da die Taktzeit der Versuche durch die Erwärmung im Kammerofen vorgegeben wird und hierdurch keine für den Schmiedeprozess typische Energieeinbringung in das Werkzeug gewährleistet werden kann, wurde die Werkzeuggrundtemperatur auf Raumtemperatur festgelegt.

Hieraus ergeben sich die Parameter:

- Rohteiltemperatur,
- Stößelgeschwindigkeit und
- Energie der Presse

als veränderliche Einstellgrößen für die vollfaktoriellen Untersuchungen.

Die Rohteiltemperatur wird durch die Ofentemperatur und die Abkühlung zwischen Entnahme des Rohteils aus dem Ofen und dem Umformen beeinflusst. Durch verfahrensspezifische Schwierigkeiten bei der Temperaturmessung von heißen Schmiederohtteilen, wird die Ofentemperatur als Parameter bei der Versuchsdurchführung gleich der Rohteiltemperatur gesetzt. Durch die kurze Handhabungszeit zwischen Ofen und Umformung (ca. 4 Sekunden) in der ersten Umformstufe ist dieses Vorgehen gerechtfertigt.

6.2.3 Versuchsplanung

Die zur Auswertung der Schmiedeversuche gewählte Versuchsmethode beruht auf einer Variation der Einstellparameter in jeweils zwei Stufen. Die hohe Einstellung ist im Folgenden mit (+1) und die niedrige Einstellung mit (-1) gekennzeichnet.

Die Art der Parametervariation ist in Tabelle 8 dargestellt.

Die Schlagenergie kann an der verwendeten Kupplungsspindelpresse nicht in kJ, sondern lediglich in Skalenteilen eingestellt werden. Dies entspricht der Strecke, auf der der Stößel angetrieben und beschleunigt wird. Hierüber wird die für die Umformung zur Verfügung stehende Energie eingestellt.

Die Einstellung wird bei hoher Geschwindigkeit des Stößels (500 mm/s) auf 155 und 157 Skalenteilen, und bei niedriger Geschwindigkeit (250 mm/s) auf 175 und 180 Skalenteilen eingestellt.

In allen Fällen werden die Festanschläge der Presse vom Stößel erreicht. Die Anpassung der Energie an die Stößelgeschwindigkeiten ist notwendig um den Energieüberschuss möglichst niedrig zu halten. Eine fünffache Wiederholung der Versuche gewährleistet eine statistische Absicherung.

Tabelle 8: Parameterniveaus der Umformung

Parameterniveau	+1	-1
Ofentemperatur	1270 °C	1240 °C
Stößelgeschwindigkeit (v-Stößel)	500 mm/s	250 mm/s
Energie (v-Stößel 500 mm/s)	157 Skt.	155 Skt.
Energie (v-Stößel 250 mm/s)	180 Skt.	175 Skt.

Den aus den Versuchsparametern resultierenden Versuchsplan zeigt Tabelle 9.

Tabelle 9: Vollfaktorieller Versuchsplan

Versuchsnummer	Parameterniveaus		
	Energie	Stößelgeschwindigkeit (v-Stößel)	Ofentemperatur
1	+1 (180 Skt.)	-1	-1
2	-1 (175 Skt.)	-1	-1
3	-1 (155 Skt.)	+1	-1
4	+1 (157 Skt.)	+1	-1
5	-1 (175 Skt.)	-1	+1
6	+1 (180 Skt.)	-1	+1
7	-1 (155 Skt.)	+1	+1
8	+1 (157 Skt.)	+1	+1

6.3 Auswertung der Versuchsergebnisse

Mit Hilfe der beschriebenen Werkzeugsysteme der ersten und zweiten Umformstufe wurden Pkw-Gangräder umformtechnisch hergestellt. In Bild 71 ist ein solches präzisionsgeschmiedetes Bauteil dargestellt.

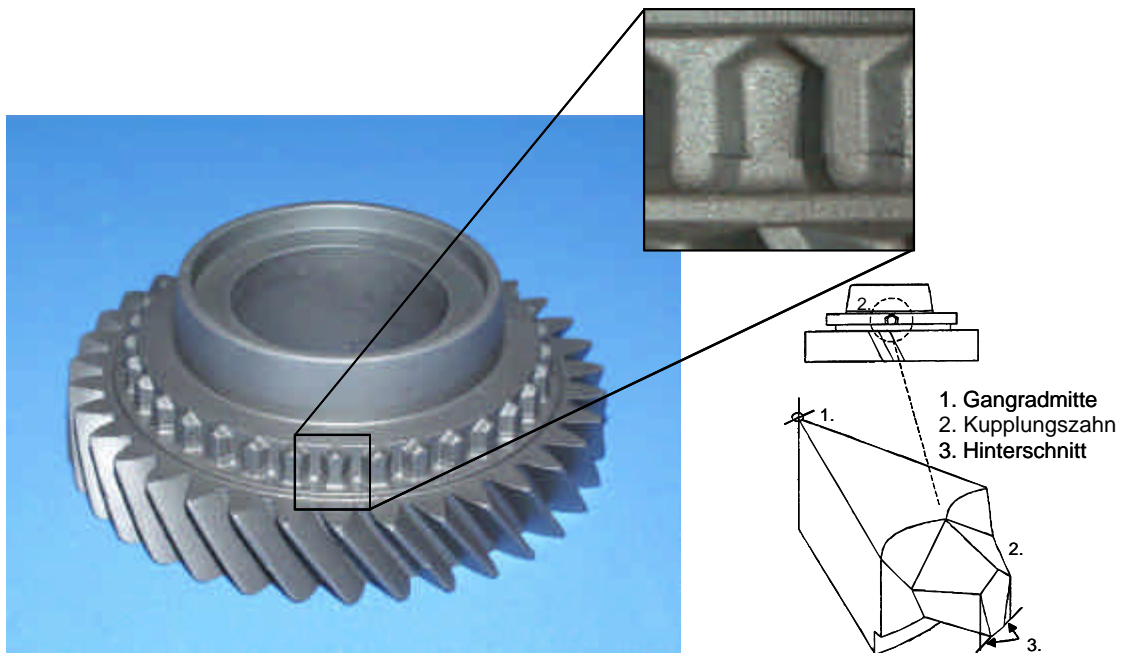


Bild 71: Mit Hinterschnitt geschmiedetes Pkw-Gangrad

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Umformung gegliedert nach den Umformstufen beschrieben.

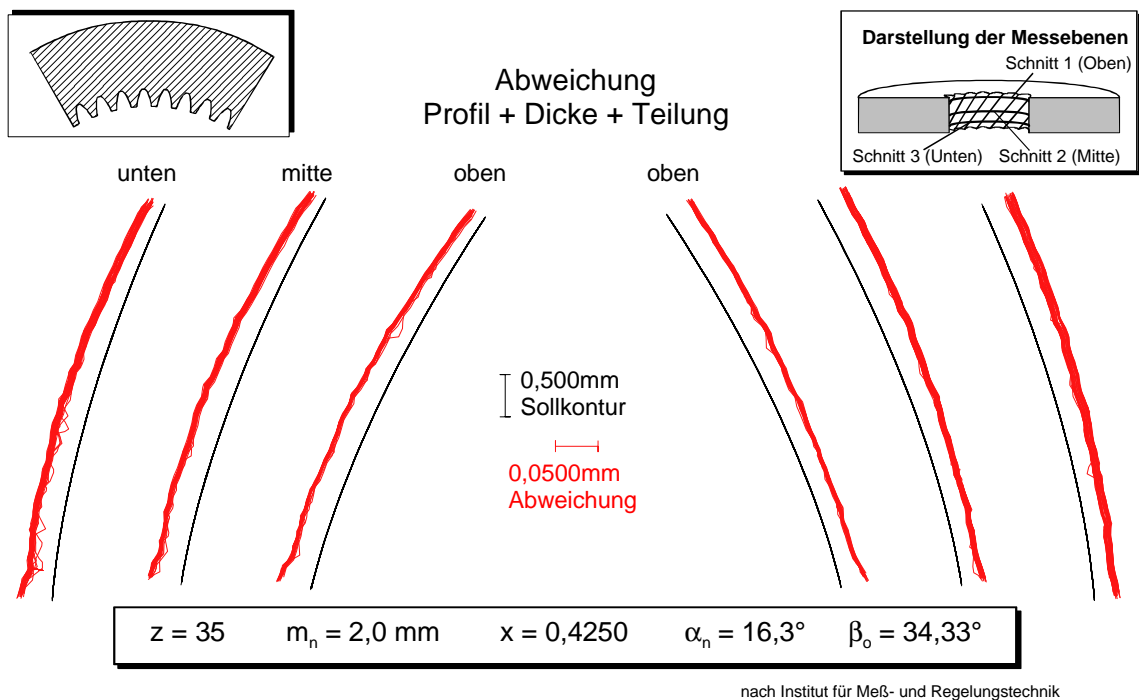
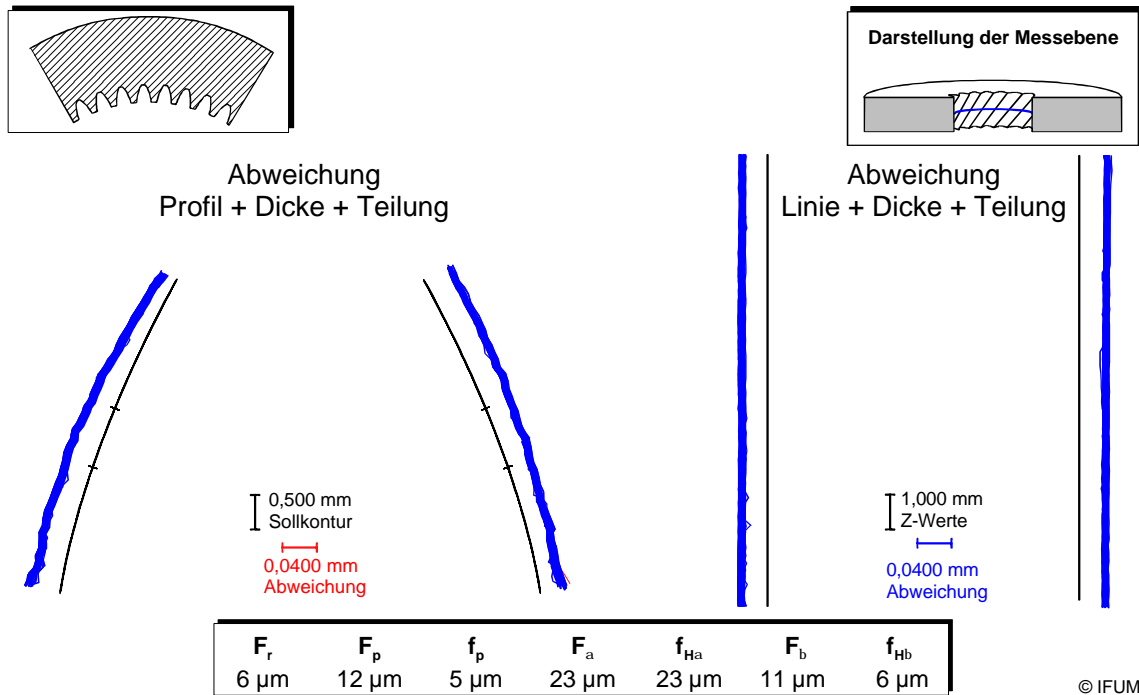
6.3.1 Ergebnis der ersten Umformstufe

Für die Beurteilung der Bauteilqualität der ersten Umformstufe wurde bei den durchgeführten Versuchen die Lauf- und Kupplungsverzahnung herangezogen. Dies geschah vor dem Hintergrund, dass an diese Geometrien die höchsten Anforderungen bezüglich Genauigkeit gestellt werden.

Der Genauigkeit der Werkzeuge kommt auf Grund des abbildenden Formgebungsverfahrens eine besondere Bedeutung zu. Nur wenn die Werkzeuge exakt hergestellt werden, können durch den Umformprozess Bauteile hoher Qualität gefertigt werden. Aus diesem Grund wurden die schrägverzahnenden Matrizen, in denen die Geometrie der Laufverzahnung abgebildet wird, durch Profilschleifen hergestellt. Hierdurch ist eine sehr hohe Qualität in Bezug auf Oberflächenbeschaffenheit und Geometrie gewährleistet.

Laufverzahnung

Die Messung der ungenutzten Matrize ist in Bild 72 a) und b) dargestellt. In Abbildung a) ist die Darstellung von Profil und Linie der mittleren Messebene abgebildet. Hierbei liegen die Abweichungen der Verzahnung von der Nenngeometrie bei maximal $23\ \mu\text{m}$. In b) sind die Profildarstellungen von drei Schnitten in unterschiedlichen Ebenen abgebildet.



b)

Bild 72: Messung ungenutzte Matrize

Anhand dieser Messergebnisse ist zu erkennen, dass die Matrize die notwendige Qualität zur Herstellung von Präzisionsschmiedeteilen aufweist. Das geforderte Aufmaß an den Flanken der Laufverzahnung darf am Schmiedeteil maximal 100 μm betragen.

Für die Untersuchungen wurden Matrizen mit folgenden Eigenschaften verwendet:

- Werkstoff: X38CrMoV5-3 (1.2367),

- Härte: 54 ± 1 HRC,
- Oberfläche nach dem Profilschleifen poliert und nitriert.

Anhand der Messungen der genutzten Matrizen können auf Grund der durchgeführten Versuche keine Aussagen über die Standzeit der Werkzeuge unter Serienbedingungen und unter Ausnutzung von verschleißschützenden Maßnahmen getroffen werden. Gleichwohl können die Messergebnisse Trends des Verschleißes aufzeigen. So kann der Ort des größten Verschleißes detektiert und Ursachen für den aufgetretenen Verschleiß ermittelt werden.

In Bild 73 ist das Messergebnis der genutzten Matrize dargestellt. Die Messung des Matrizenprofils wurde in drei Ebenen durchgeführt, da auf Grund der Umformung unterschiedliche Belastungen über die Matrizenhöhe auftreten. Ebenfalls kommt es während des Ausstoßvorgangs zu ungleichmäßigen Belastungen an der Matrizeengeometrie. Die verschiedenen auftretenden Belastungen führen zu unregelmäßigen Abweichungen an der Matrizeengeometrie.

Bei der Profilmessung ist hierbei ein Untermaß im Bereich des Zahnfußes der Laufverzahnung zu erkennen (Bild 73 a). Dies ist durch das Fließen des Werkstoffs über den Bereich des Zahnkopfes der Matrize zu erklären, welches zum Anstauchen des Matrizenmaterials in diesem Bereich führt. Diese Begründung wird durch die Tatsache gestützt, dass im Bereich der mittleren Ebene das Material am längsten an der Matrize anliegt und somit durch die längere Druckberührzeit eine größere Wärmemenge eingeleitet wird, die zu einer höheren thermischen Schädigung führt. Hierdurch wird der vergütete Werkstoff angelassen, was eine Entfestigung bewirkt. Somit kann das Werkzeug durch die Fließbewegung des Werkstückmaterials leichter deformiert werden.

Neben der Abweichung im Bereich des Zahnfußes der Bauteile kommt es im Verlauf der Werkzeugnutzungsdauer zu einer Verringerung der Zahndicke. Hierbei kommt es durch das Verdrängen des Materials am Zahnkopf der Matrize zu einer Anlagerung des Materials an den Flanken der verzahnten Matrize. Die Abweichungen der Messwerte von den Solldaten resultieren nicht allein aus der Belastung des Werkzeuges durch die Umformung sondern auch durch die des Ausstoßprozesses, obwohl ein aktiver Ausstoßer verwandt wird.

Der Ausstoßprozess des Bauteils aus der schrägverzahnten Matrize führt ebenfalls zu erhöhten Belastungen des Werkzeuges. Zur Reduzierung der Belastung wurde hierfür ein aktiv drehender Auswerfer konzipiert, der die rein vertikale Bewegung des maschinenseitigen Auswerfers in eine spiralförmige Bewegung wandelt. Hierbei musste darauf geachtet werden, dass die Drehbewegung des Auswerfers mit der Schrägung der Matrize übereinstimmt. Durch die Verwendung des aktiv drehenden Auswerfers konnte die Auswerferkraft und somit die Belastung der Matrize auf ca. 30 % reduziert werden. Die benötigten Kräfte zum Auswerfen der Bauteile unter Verwendung des aktiv drehenden Systems liegen bei ca. 25 – 30 kN.

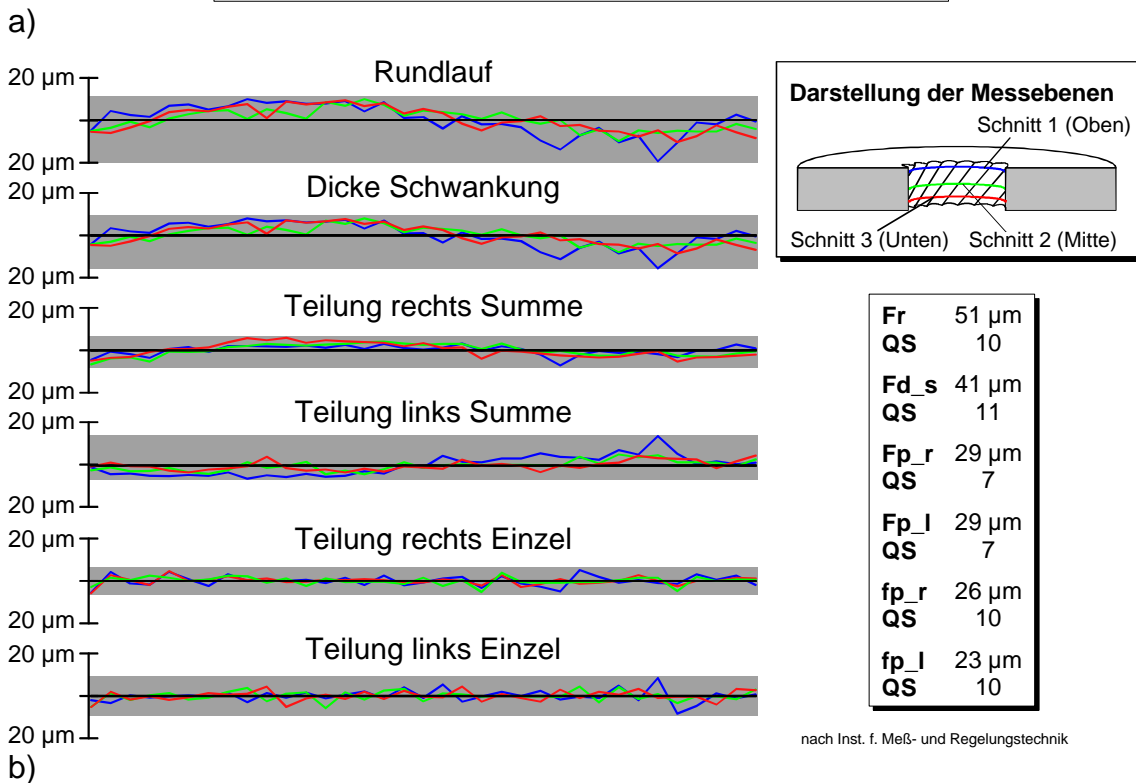
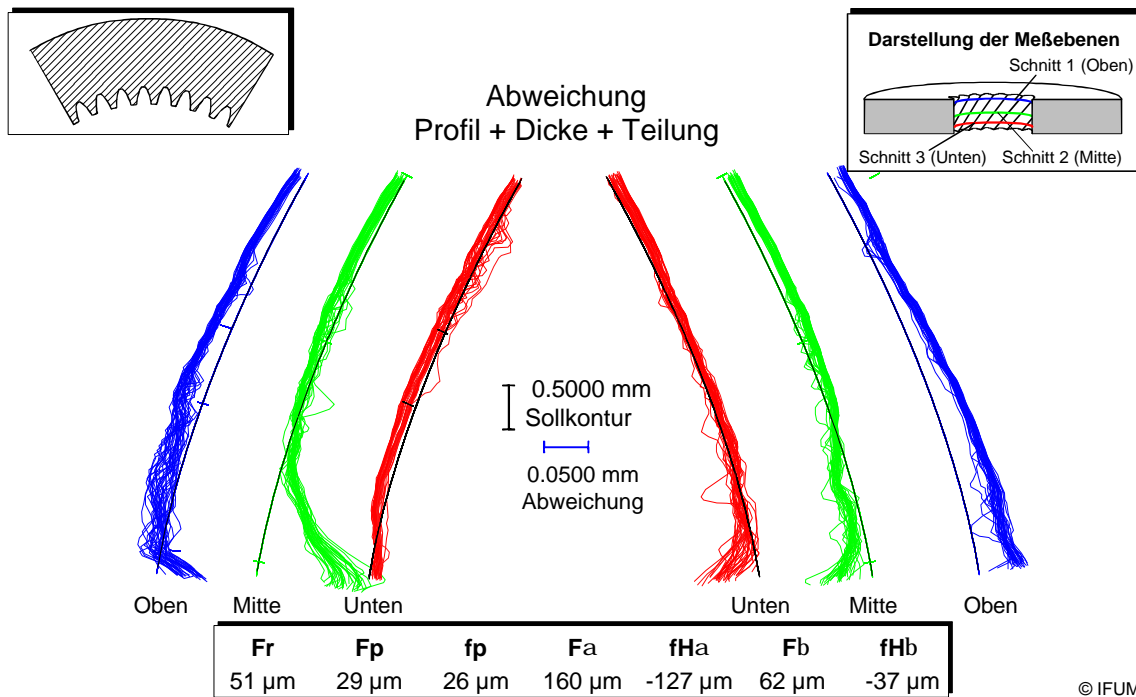


Bild 73: Messwerte der genutzten Matrize

Durch den Ausstoßprozess wird die jeweils linke Flanke der Matrizenverzahnung beansprucht. Dies spiegelt sich in einer stärkeren Streuung der Profilmessschriebe der linken Flanke wider. Insbesondere das Profil der linken Flanke im Bereich der oberen Schnittbene weist diese Streuungen auf. In der Darstellung von Rundlauf, Dicke und Teilung (**Bild 73 b**) sind die Abweichungen in der oberen Ebene an der linken Flanke ebenfalls deutlich unregelmäßiger.

Durch die Gegenüberstellung der Messwerte von genutzter und ungenutzter Matrize werden die verschleißbedingten Abweichungen der Matrizengeometrie deutlich (Bild 74).

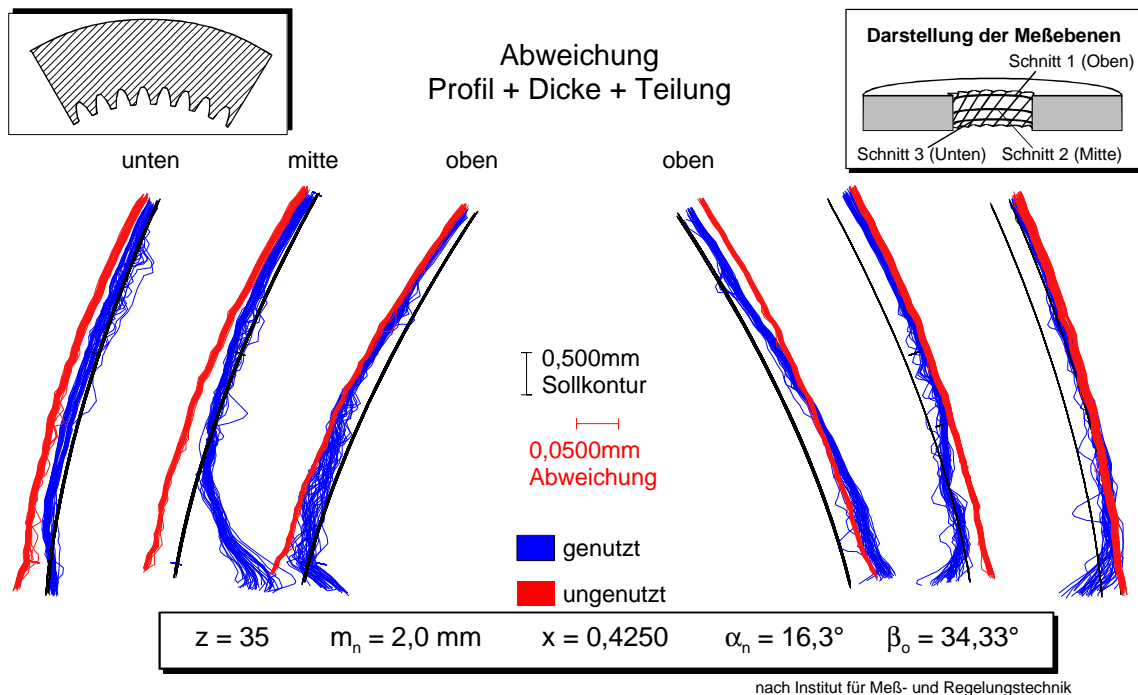


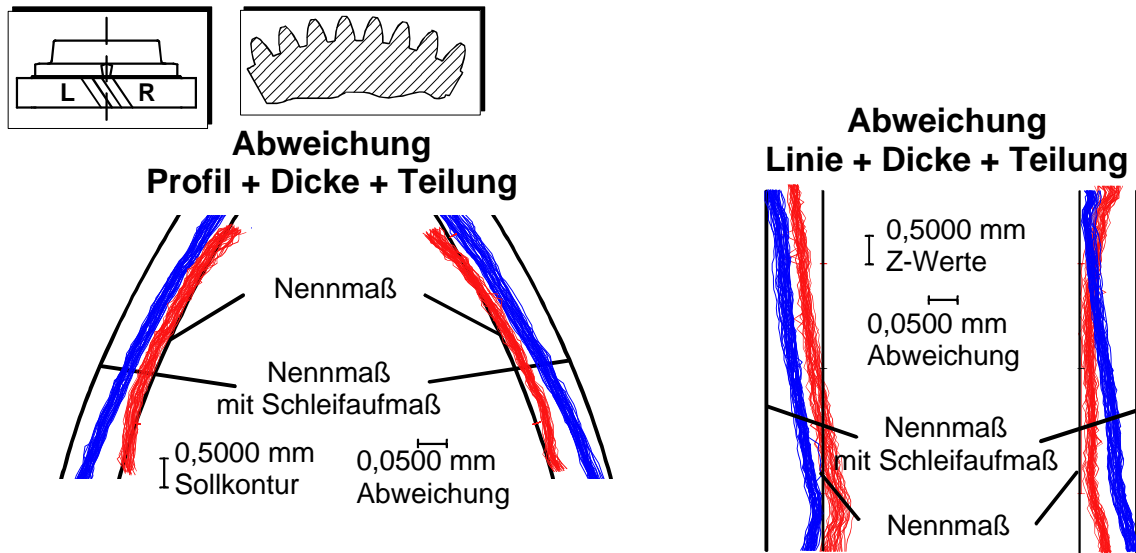
Bild 74: Gegenüberstellung der Matrizengeometrien (ungenutzt - genutzt)

Die Abweichungen, die bei der Messung der Matrizengeometrie sichtbar werden, spiegeln sich in den Bauteilgeometrien wider. In Bild 75 sind die Geometriemessungen zweier Laufverzahnungen gegenübergestellt. Es handelt sich um Bauteile, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten der Versuche gefertigt wurden. Bauteil 10 wurde zu Beginn der Untersuchungen geschmiedet. Hierbei sind die Werkzeuggeometrien der ungenutzten Matrize zu Grunde zu legen. Im Vergleich dazu ist das Bauteil 300 zu sehen, das kurz vor der Messung der genutzten Matrize geschmiedet wurde.

Die Darstellung der Profilmessung der Laufverzahnung zeigt, dass die Geometrie des Bauteils 10 innerhalb der geforderten Toleranz liegt. Es ist jedoch eine unterschiedliche Aufmaßverteilung über den Zahn zu erkennen. Bei der Darstellung der Flankenlinie ist bei Bauteil 10 eine gleichmäßige Verkipfung der Messung der linken und rechten Linien zu erkennen. Alle systematischen Abweichungen, wie Z. B. die gleichmäßige Verkipfung der Linie an allen Zähnen, lassen sich durch eine Korrektur der Werkzeuggeometrie für folgende Werkzeuge ausgleichen.

Bauteil 300 weist im Vergleich zu Bauteil 10 ein geringeres Aufmaß, teilweise sogar Untermaß auf. Dies ist auf die bereits beschriebenen Effekte des Matrizenverschleißes zurückzuführen. Die Abweichung der rechten Flanke am Bauteil (entspricht der linken Werkzeugflanke) in der Darstellung von Linie, Dicke und Teilung ist auf die Belastung während des Ausstoßprozesses und den dadurch ungleichmäßigen Verschleiß von linker und rechter Flanke

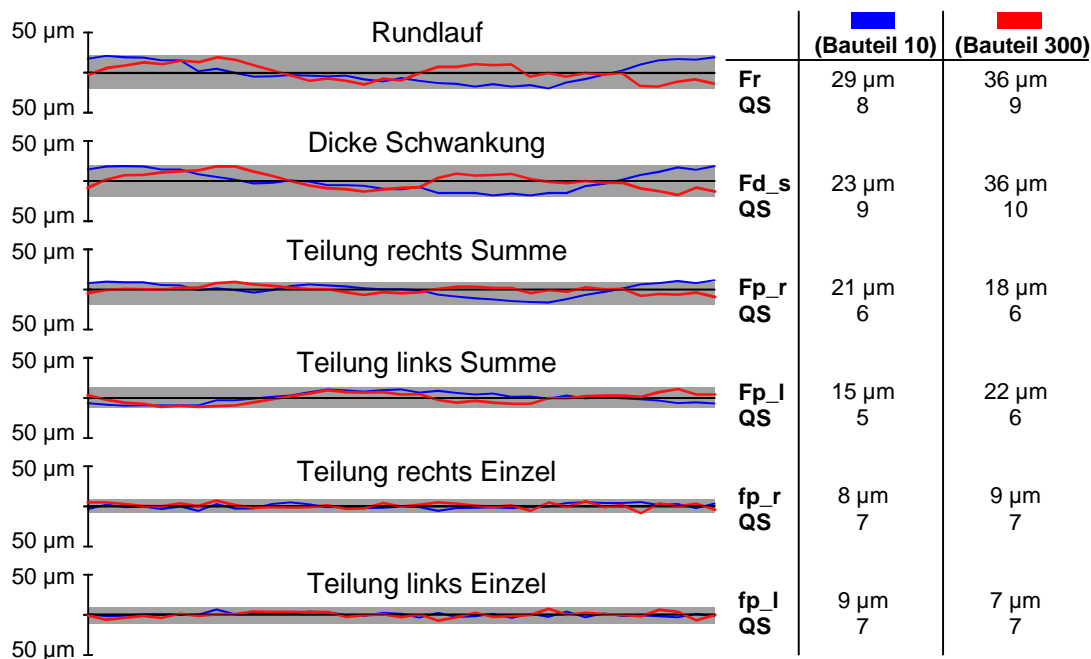
zurückzuführen. Ebenfalls kommt es aufgrund der erhöhten Kräfteinleitung in Folge von nicht mehr exakt ausgerichteten Werkzeugführungen (Schrägungswinkel von Ausstoßer und Matrize) im Verlauf des Ausstoßprozesses bei der genutzten Matrize zu Verformungen an den Bauteilen. Die erreichten Qualitäten in Bezug auf Rundlauf, Dickschwankung und Teilung der Bauteile liegen im Bereich von Qualitätsstufe IT 5 bis IT 10 (siehe Bild 75 b).



	F_r	F_p	f_p	F_a	f_{Ha}	F_b	f_{Hb}
■ (Bauteil 10)	29 μm	21 μm	9 μm	41 μm	~100 μm	72 μm	140 μm
■ (Bauteil 300)	36 μm	22 μm	9 μm	44 μm	-140 μm	62 μm	120 μm

nach Institut für Meß- und Regelungstechnik

a)



b)

Bild 75: Verzahnungsmessung Laufverzahnung Bauteil 10 – Bauteil 300 (nach erster Stufe)

Kupplungsverzahnung

Die Geometriemessung des Oberwerkzeuges, in dem die Kupplungsverzahnung ohne Hinterschnitt abgebildet wird, ist in Bild 76 zu verschiedenen Zeitpunkten dargestellt.

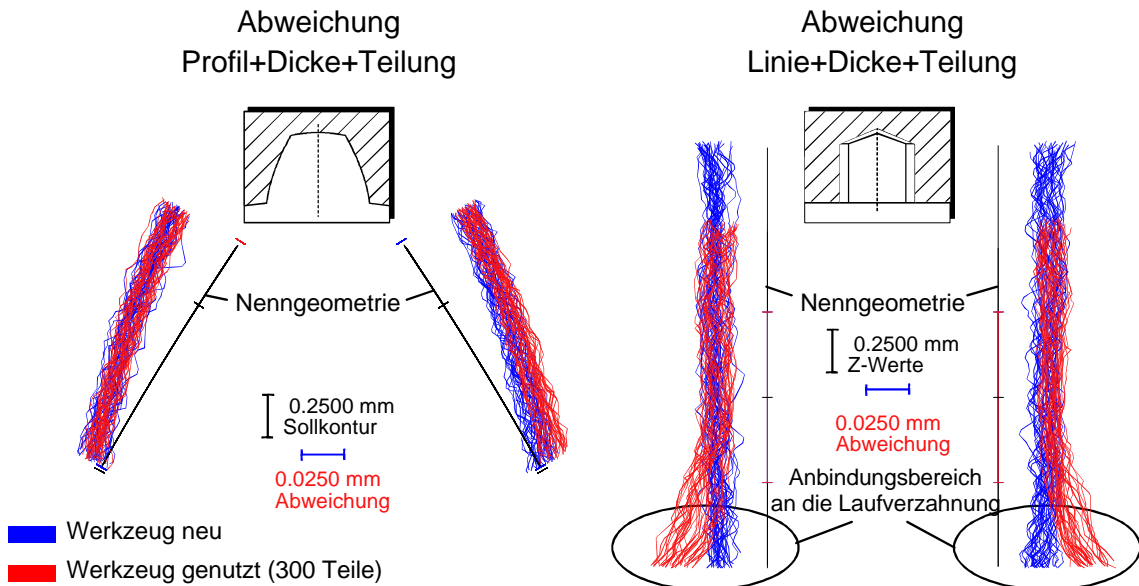


Bild 76: Messwerte Obergesenk (Kupplungsverzahnung)

Die Gegenüberstellung von genutzter und ungenutzter Matrizengeometrie zeigt, dass sich der Verschleiß im Bereich der Kupplungszähne auf deren Anbindung an den Grundkörper der Laufverzahnung beschränkt. Dieser Bereich ist bei der spanenden Fertigung durch eine umlaufende Nut gekennzeichnet. Dies zeigt, dass dort keine funktionellen Anforderungen an das Bauteil gestellt werden. Aus diesem Grund ist der dort auftretende Verschleiß zu tolerieren.

Die Verkippung des Eingriffswinkels im Vergleich zu der Nenngeometrie des Bauteils kann aufgrund der anschließenden Kalibrierung des Bauteils in der zweiten Umformstufe, speziell im Bereich der Kupplungsverzahnung, toleriert werden.

Die Geometriemessung eines Bauteils im Bereich der Kupplungsverzahnung ist in Bild 77 dargestellt. Hierbei liegt die in der ersten Umformstufe erzeugte Geometrie der Kupplungsverzahnung in einem Toleranzbereich von maximal 0,1 mm Aufmaß. Das überschüssige Material wird bei der Hinterschnitterzeugung in Bereiche verdrängt, die grob toleriert sind. Die Schwankungen der Messungen der einzelnen Zähne eines Rades liegen bei ca. 30 µm.

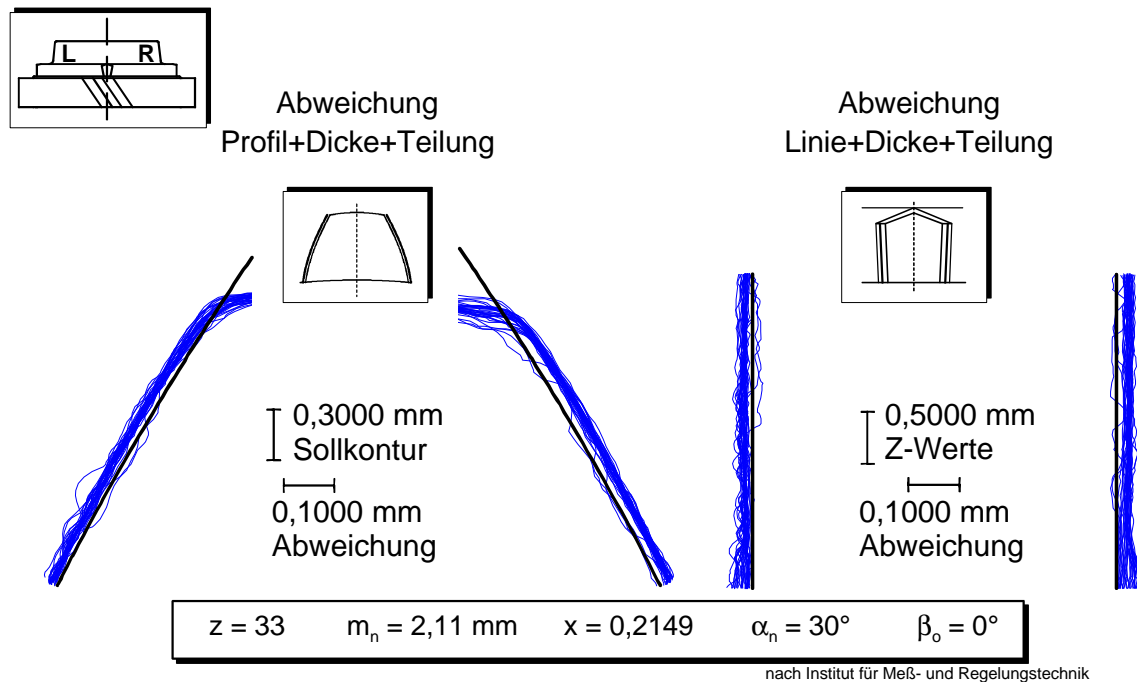


Bild 77: Verzahnungsmessung Kupplungsverzahnung (erste Stufe)

6.3.1.1 Bewertung der Einflussgrößen auf wesentliche Qualitätsmerkmale und Messgrößen

Beeinflussung des Prozesses durch unterschiedliche Rohteilgewichte

Die Gewichtsverteilung der Rohteile wurde mit Hilfe einer elektronischen Waage ermittelt.

Das Durchschnittsgewicht der Rohteile betrug 726 g. Die errechnete Standardabweichung ergab einen Wert von 1,13 g. Dies entspricht umgerechnet ca. 0,16 % vom Ausgangsgewicht. Die maximale Abweichung beträgt 3 g bzw. 0,4 %. Dies kann nach /6/ als zulässige Massenabweichung (max. 0,5 %) angesehen werden und muss nicht gesondert betrachtet werden. Die Massenschwankungen wurden bei diesen Untersuchungen nicht als gesonderter Parameter berücksichtigt.

Einfluss der Parameter auf die Messgrößen

Im Folgenden soll der Einfluss der Einstellgrößen Temperatur, Stößelgeschwindigkeit und Schlagenergie auf die Messgrößen Gestell-, Umform- und Auswerferkraft aufgezeigt werden. Die von der im Werkzeugsystem integrierten Messtechnik aufgezeichneten Daten lassen sich für eine Auswertung der während der Umformung auftretenden Kräfte und zurückgelegten Wege nutzen.

Für die gewählten Parameter ergibt sich bei der Auswertung der F-Testgrößen eine **Signifikanzgrenze von 6**. Dies bedeutet, dass ab diesem Wert der F-Testgröße die betrachteten Parameter einen signifikanten Einfluss auf die Messgröße haben.

Gestellkraft

Die Gestellkraft ist die Summe aus Umform-, Feder- und Anschlagkraft. Die Federkraft ist, sobald der Stempel die Festanschläge erreicht, bei allen Versuchen konstant.

Bei der Betrachtung der Gestellkräfte tritt neben dem signifikanten Einfluss der Schlagenergie eine signifikante Wechselwirkung zwischen der Schlagenergie und der Stößelgeschwindigkeit auf (Bild 78).

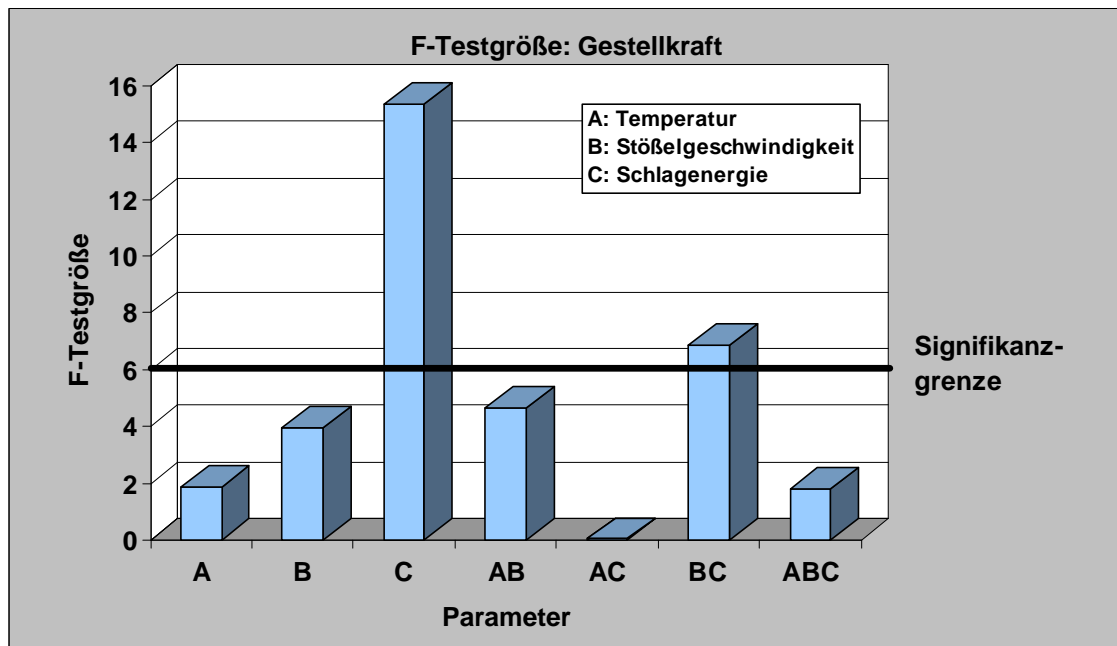


Bild 78: Auswirkungen der Variationen der Parameter auf die Gestellkraft

Der Einfluss der Schlagenergie auf die Gestellkraft ist in Bild 79 dargestellt. Hierbei zeigt sich, dass bei der Stößelgeschwindigkeit 250 mm/s der Einfluss deutlich ausgeprägt ist (Erhöhung um 350 kN). Die Wechselwirkung von Schlagenergie und Stößelgeschwindigkeit (Parameter BC, Bild 78) spiegelt sich dadurch wider, dass bei der Stößelgeschwindigkeit 500 mm/s die Gestellkraft über die Variation der Schlagenergie unverändert bleibt.

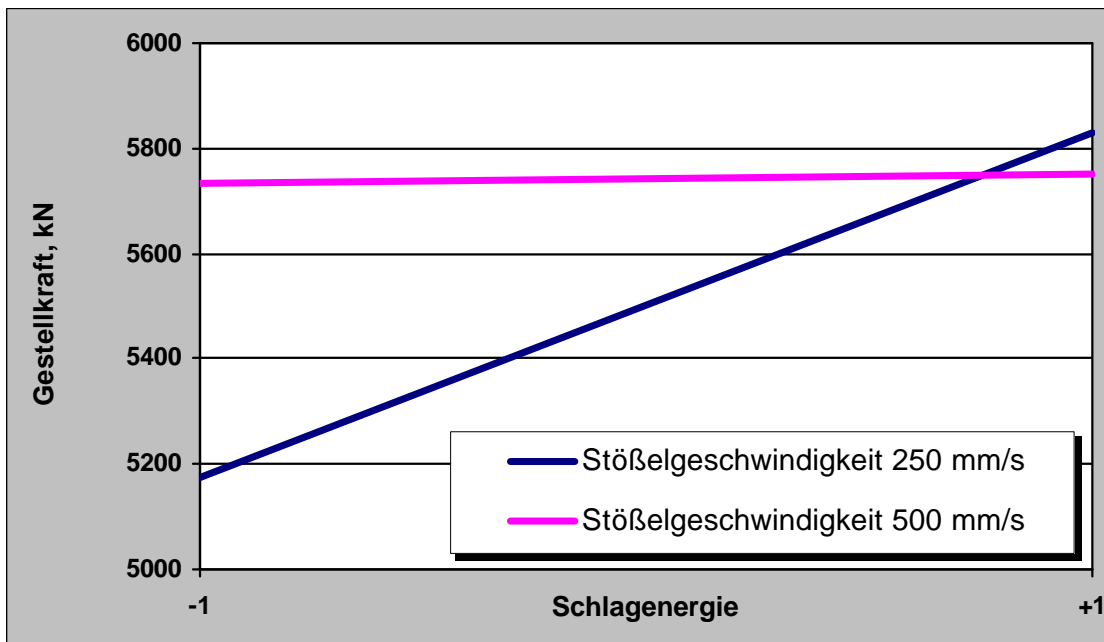


Bild 79: Einflüsse der Parameter Schlagenergie und Stößelgeschwindigkeit auf die Gestellkraft

Umformkraft

Signifikanten Einfluss auf die Umformkraft hat lediglich die Stößelgeschwindigkeit (Bild 80). Die Parameter Temperatur und Schlagenergie sowie die Wechselwirkung von Temperatur und Stößelgeschwindigkeit weisen nach der Definition der F-Testgröße keine signifikanten Einflüsse auf. Der Einfluss der Temperatur auf die Umformkraft lässt sich jedoch trotz einer F-Testgröße von 4,5 in Bild 81 bei der Stößelgeschwindigkeit 500 mm/s deutlich erkennen. Hierbei nimmt die Umformkraft bei steigender Temperatur ab.

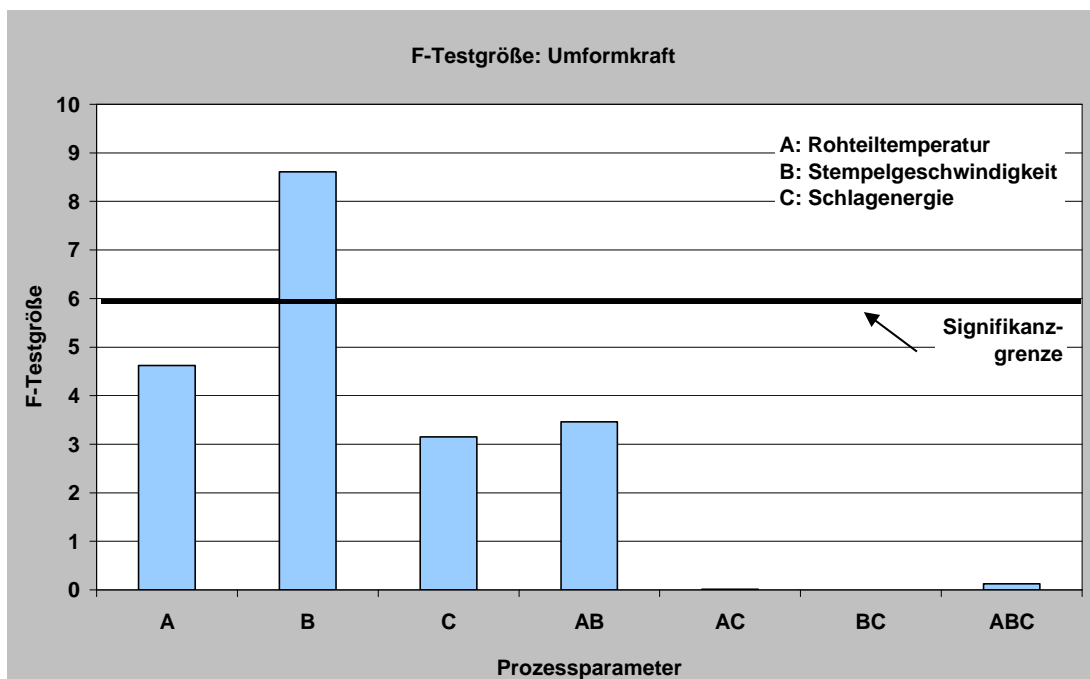


Bild 80: Auswirkungen der Variationen der Parameter auf die Umformkraft

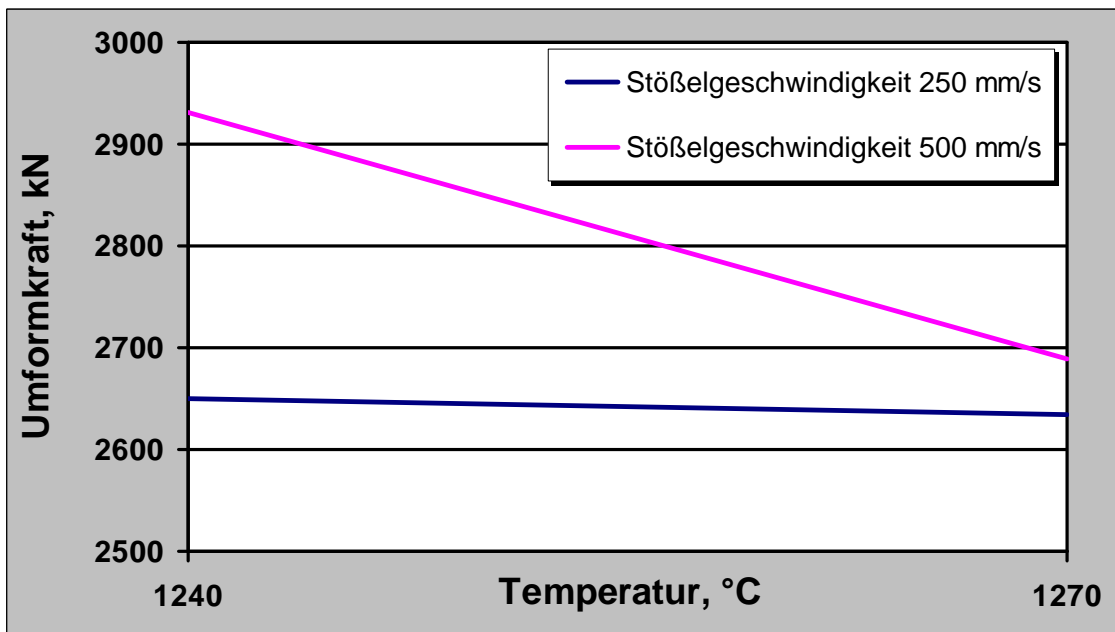


Bild 81: Einflüsse der Parameter auf die Umformkraft

Die Verläufe der Umformkraft über die Zeit für unterschiedliche Stößelgeschwindigkeiten sind in **Bild 82** dargestellt. Die Messkurven verlaufen qualitativ gleich. Dies bedeutet, dass die Umformung des Bauteils bei unterschiedlichen Stößelgeschwindigkeiten ähnlich abläuft. Bei einer Stößelgeschwindigkeit von 500 mm/s ist die Erhöhung der Umformkraft gegenüber einer Stößelgeschwindigkeit von 250 mm/s auf den veränderten Fließwiderstand zurückzuführen.

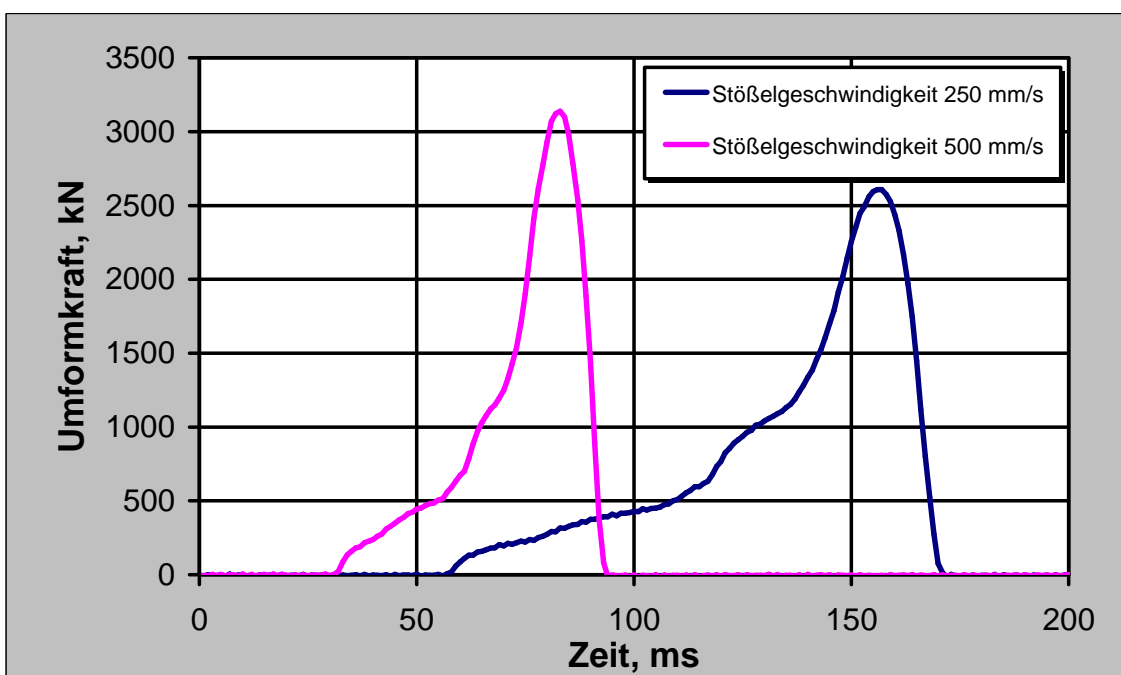


Bild 82: Umformkraftverlauf bei unterschiedlicher Stößelgeschwindigkeit

Auswerferkraft

Haupteinflussgröße auf die Auswerferkraft ist die Rohteiltemperatur (Bild 83). Mit steigender Rohteiltemperatur kann die benötigte Auswerferkraft gesenkt werden (Bild 84). Dies ist durch den Sachverhalt begründet, dass sich das geschmiedete Bauteil im direkten Anschluss an die Umformung durch den Kontakt mit dem Werkzeug abkühlt und somit schrumpft. Je höher hierbei die Ausgangstemperatur ist, desto höher ist die durch den Wärmestrom abgeführte Energie und desto größer ist der Schrumpfungsbetrag. Dies bewirkt, dass lediglich geringe Kontaktspannungen zwischen Werkstück und Werkzeug während des Ausstoßprozesses vorherrschen und so die beim Ausstoßen zu überwindende Reibung reduziert ist.

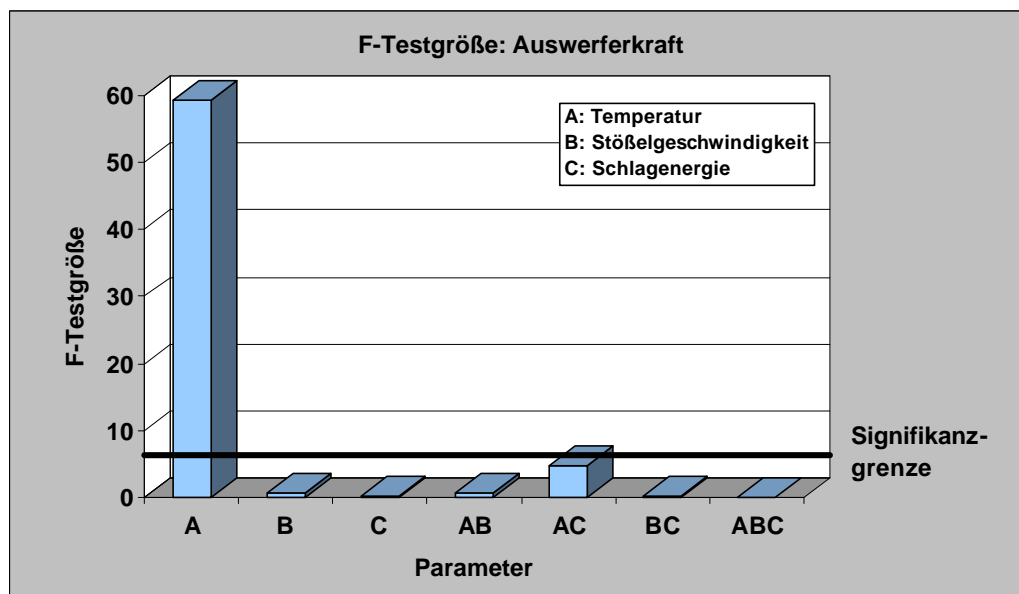


Bild 83: Einflüsse der Parameter auf die Auswerferkraft

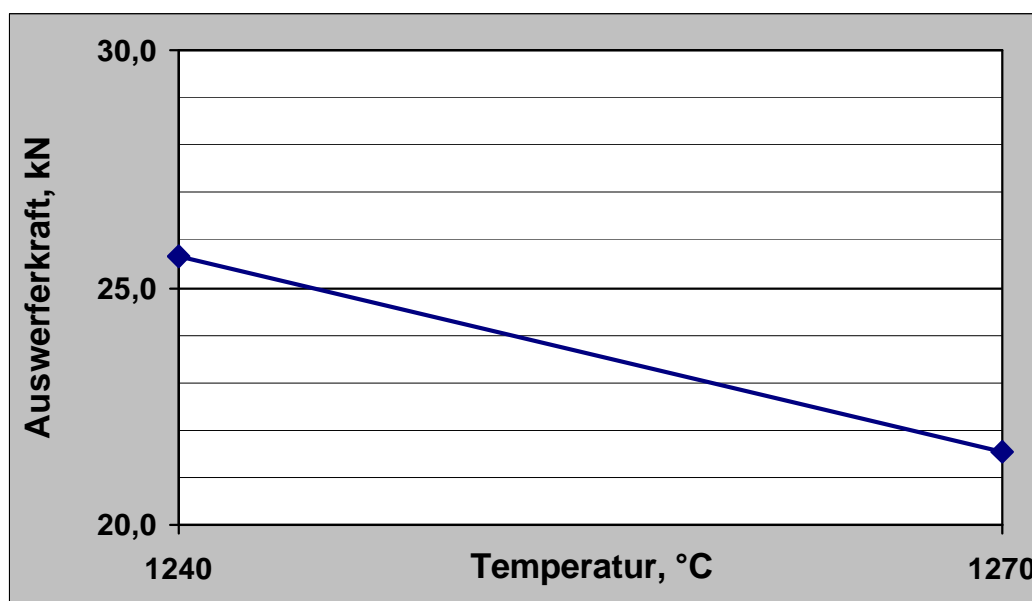


Bild 84: Auswirkungen der Variation der Temperatur auf die Auswerferkraft

Parametereinflüsse auf unterschiedliche Bauteilmaße

Im weiteren werden die Parametereinflüsse auf die Bauteilmaße ermittelt. Die aufgenommenen Bauteilmaße können in zwei Gruppen eingeteilt werden. Unterschieden wird zwischen

- werkzeugabhängigen und
- werkzeugunabhängigen Bauteilmaßen.

Zu den werkzeugabhängigen Maßen gehören Maße, die durch die Werkzeuggeometrie festgelegt sind, wie z. B. die Breite der Laufverzahnung oder der Durchmesser des Zahnrades. Zu den werkzeugunabhängigen Maßen gehören alle Maße, die nicht an das Werkzeug gebunden sind und überwiegend durch die Umformparameter bestimmt werden, z. B. Höhenmaße.

Werkzeugunabhängige Bauteilmaße

Die werkzeugunabhängigen Maße werden stark von den Umformparametern beeinflusst. Wie schon erläutert, wurden bei den Versuchen die Parameter Rohteiltemperatur, Stößelgeschwindigkeit und Schlagenergie variiert, da diese Parameter in der Praxis gezielt verändert werden können. Zur Auswertung wurden folgende vier werkzeugunabhängige Maße ermittelt und auf signifikante Einflüsse seitens der Umformparameter untersucht:

Konushöhe (h_1):	Vom Kopf der Kupplungsverzahnung bis zur Oberkante des Zahnrades
Absatzhöhe, innen (h_2):	Von der oberen Anschlagfläche bis zur Oberkante des Zahnrades
Unterstempeleindringtiefe (h_3):	Von der unteren Anschlagfläche bis zum Fuß der Laufverzahnung
Innenhöhe (h_4):	Bauteilabmaß zwischen Kopf der Kupplungsverzahnung und der Nut der Unterseite

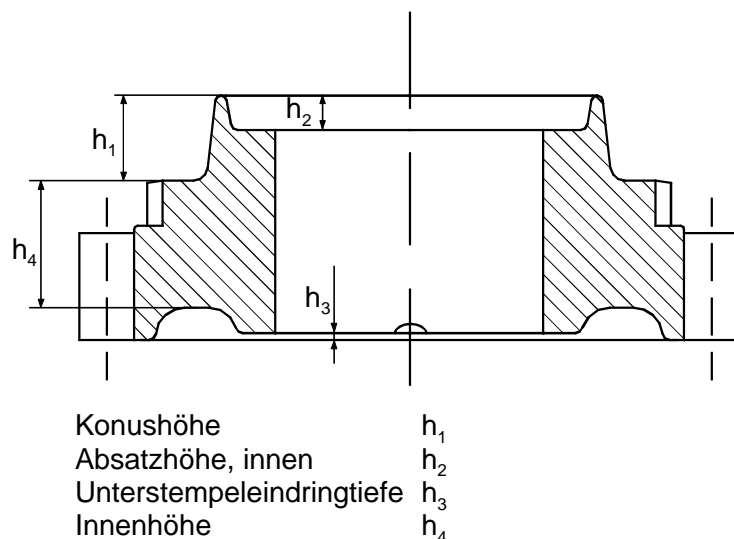


Bild 85: Darstellung definierter Bauteilmaße

Aus den vollfaktoriellen Versuchen ergab sich, dass die Temperatur der Rohteile den größten Einfluss auf die werkzeugunabhängigen Bauteilmaße hat.

Bei der Veränderung der Temperatur vom niedrigen zum hohen Niveau konnte ein signifikanter Einfluss auf die Maße „Konushöhe“ und „Absatzhöhe, innen“ festgestellt werden. Mit zunehmender Temperatur nehmen diese Maße ab.

Das Bauteilmaß „Unterstempeleindringtiefe“ wird direkt durch das Eindringen des Unterstempels in das Bauteil beschrieben. Begünstigende Faktoren sind dabei eine hohe Temperatur und eine niedrige Stößelgeschwindigkeit. Die vorteilhafte Wirkung einer niedrigeren Stößelgeschwindigkeit und einer höheren Temperatur ist auf die Abhängigkeit der Fließspannung k_f von der Umformgeschwindigkeit \dot{j} zurückzuführen /56/. Des Weiteren treten bei diesem Maß Wechselwirkungen auf, die jedoch unterhalb der Signifikanzgrenze liegen. Das Bauteilmaß „Innenhöhe“ ist über die geometrischen Bedingungen des Bauteils direkt mit der „Unterstempeleindringtiefe“ verbunden. Die Ergebnisse der Untersuchungen weisen daher die gleichen Abhängigkeiten auf.

Werkzeugabhängige Bauteilmaße

Ein signifikanter Einfluss der Prozessparameter auf werkzeugabhängige Maße, wie z. B. die Innen- und Außendurchmesser, konnte nicht festgestellt werden.

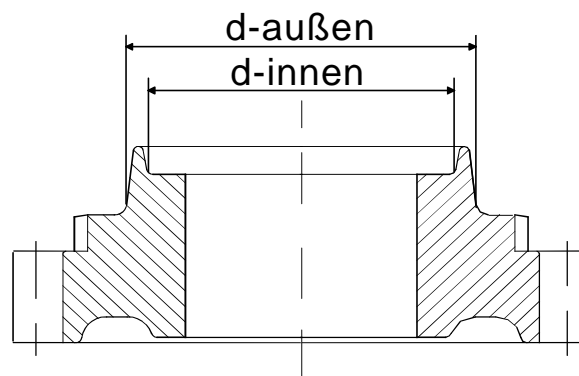


Bild 86: Innen- und Außendurchmesser des Zahnrades

6.3.2 Ergebnis der zweiten Umformstufe

Für die Beurteilung der Einflüsse der zweiten Umformstufe auf die Geometrie des Bauteils werden die Bauteilgeometrien Kupplungsverzahnung und Laufverzahnung herangezogen.

Anhand der Messergebnisse der Geometrie der Kupplungsverzahnung soll das Verfahren der Hinterschnitteinbringung bewertet werden. Die Messung der Laufverzahnung nach der zweiten Umformstufe in Verbindung mit den Messergebnissen der ersten Umformstufe wird zu einer Bewertung des Einflusses der Hinterschnitteinbringung auf die bereits fertig geschmiedete Laufverzahnung des Bauteils genutzt.

6.3.2.1 Umformergebnis im Bereich der Kupplungsverzahnung

Werkzeugsystem mit maschinenseitigem Anschlag

Die in Kapitel 6.1.3.2 im Bild 53 beschriebenen Varianten des Werkzeugsystems mit und ohne Anschlag werden im folgenden auf die Reproduzierbarkeit der Hinterschnitteinbringung untersucht.

Der maschinenseitige Anschlag begrenzt den Stößelweg der Presse. Dieses führt indirekt zu einer Begrenzung der Schieberbewegung. Trotz eines maschinenseitigen Anschlags kommt es durch die hohen Kräfte und Geschwindigkeiten bei der Umformung zu Ungenauigkeiten bei der Verfahrbewegung der Schieber. Diese Ungenauigkeiten bilden sich in der Kupplungsverzahnung ab. Es entstehen unzulässige Abweichungen, die als Ausschusskriterium bei der Qualitätskontrolle gelten.

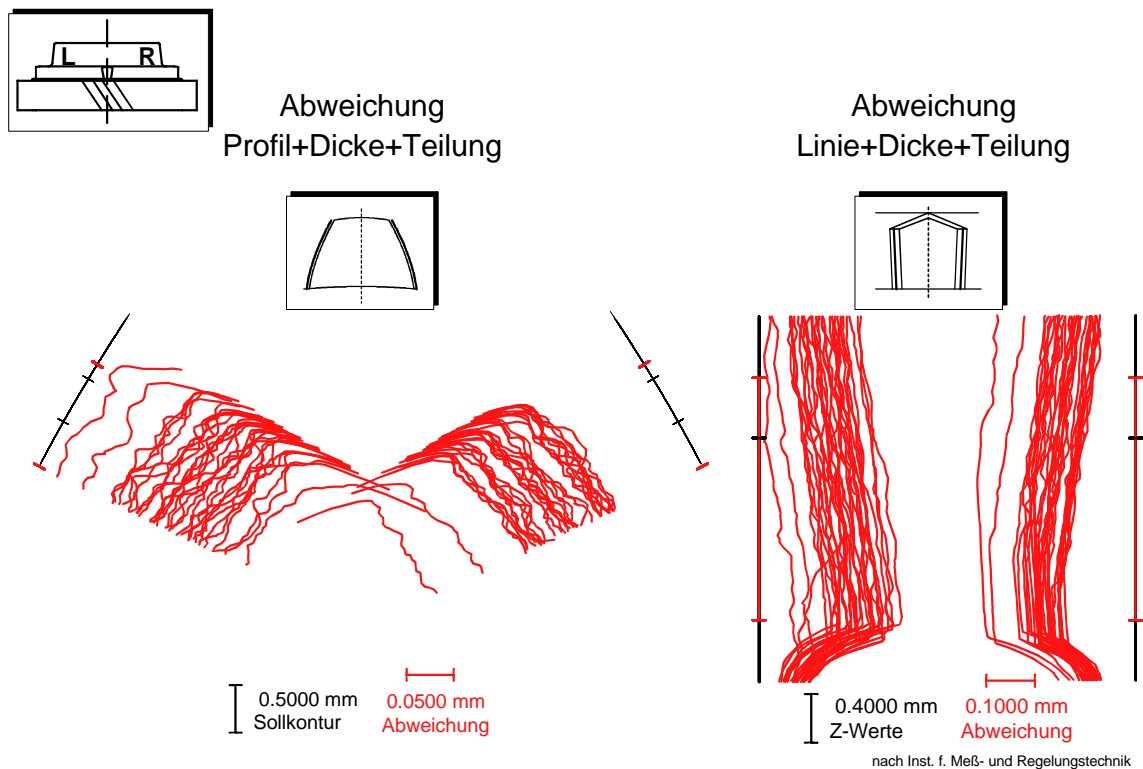


Bild 87: Messwerte der hinterschnittenen Kupplungsverzahnung mit maschinenseitigem Anschlag

Die in Bild 87 dargestellten Messergebnisse der Kupplungsverzahnung zeigen die Geometrieabweichungen sehr deutlich. Zum einen ist ein deutliches Untermaß an der Kupplungsverzahnung vorhanden, zum Anderen liegt die Streuung der Messwerte mit $> 0,1$ mm außerhalb der Toleranz. Diese Streuungen setzen sich aus Prozessschwankungen (z. B. Abkühlbedingungen, Positionierungenauigkeiten) sowie Maschinen- und Werkzeugungenauigkeiten (z. B. Auffederung und Kippung) zusammen. Für eine Vermeidung bzw. eine Verringerung der Abweichungen ist es notwendig, die Begrenzungen der Umformung möglichst nah an den Umformvorgang zu legen. Dies führt zum Einsatz eines werkzeugseitigen Anschlags.

Werkzeugsystem mit werkzeugseitigem Anschlag

In Verbindung mit dem maschinenseitigen Anschlag sorgt der werkzeugseitige Anschlag für eine anforderungsgerechte Hinterschnitteinbringung. Hierbei kommt dem maschinenseitigen Anschlag die Aufgabe zu, das Werkzeug vor Überlast zu schützen. Der werkzeugseitige Anschlag ist für die exakte Begrenzung der Schieberbewegung zuständig. Um die Gefahr des Klemmens durch eine Doppelpassung zu vermeiden, wird die Schieberbewegung durch Elastomere von der Stößelbewegung entkoppelt. Das Werkzeug ist in Bild 54, Seite 60, zu sehen.

Durch den Einsatz des werkzeugseitigen Anschlags konnten die Abweichungen an der Kupplungsverzahnung deutlich reduziert werden. Die gemessenen Verzahnungsdaten sind Tabelle 10 zu entnehmen.

Tabelle 10: Messwerte der Kupplungsverzahnung
(werkzeugseitiger Anschlag)

	Rad 31		Rad 32		Rad 33		Rad 34	
	Messwert	IT-Klasse	Messwert	IT-Klasse	Messwert	IT-Klasse	Messwert	IT-Klasse
$F_r - e$	37 μm	8	62 μm	10	33 μm	8	54 μm	9
F_{pl}	40 μm	8	73 μm	10	133 μm	11	151 μm	11
F_{pr}	47 μm	8	78 μm	10	132 μm	11	156 μm	11
f_{pl}	42 μm	11	48 μm	11	57 μm	12	78 μm	12
f_{pr}	53 μm	12	64 μm	12	61 μm	12	68 μm	12

6.3.2.2 Einfluss der zweite Umformstufe auf die Laufverzahnung

In diesem Kapitel werden die Messungen der Laufverzahnung nach der zweiten Umformstufe diskutiert. Die Laufverzahnung wurde bereits in der ersten Umformstufe fertig geschmiedet. Aufgrund der partiellen Umformung der zweiten Stufe ist zu überprüfen, inwieweit diese Umformung die Geometrie der Laufverzahnung beeinflusst. Die Untersuchungen der durch die partielle Umformung der zweiten Stufe hervorgerufenen Abweichungen beziehen sich hierbei lediglich auf die Nutzung des Werkzeugsystems mit einem werkzeugseitigen Anschlag.

Für die Ermittlung der durch die zweite Umformstufe hervorgerufenen Beeinflussungen der Laufverzahnung wurden in Bild 88 die Messungen der Laufverzahnungen zweier Zahnräder, die in direkter Abfolge geschmiedet wurden, gegenübergestellt. Ein Zahnrad wurde hierbei im Anschluss an die erste Umformstufe direkt in Sand abgekühlt. Das andere Rad wurde in der zweiten Umformstufe mit einem Hinterschnitt im Bereich der Kupplungsverzahnung versehen.

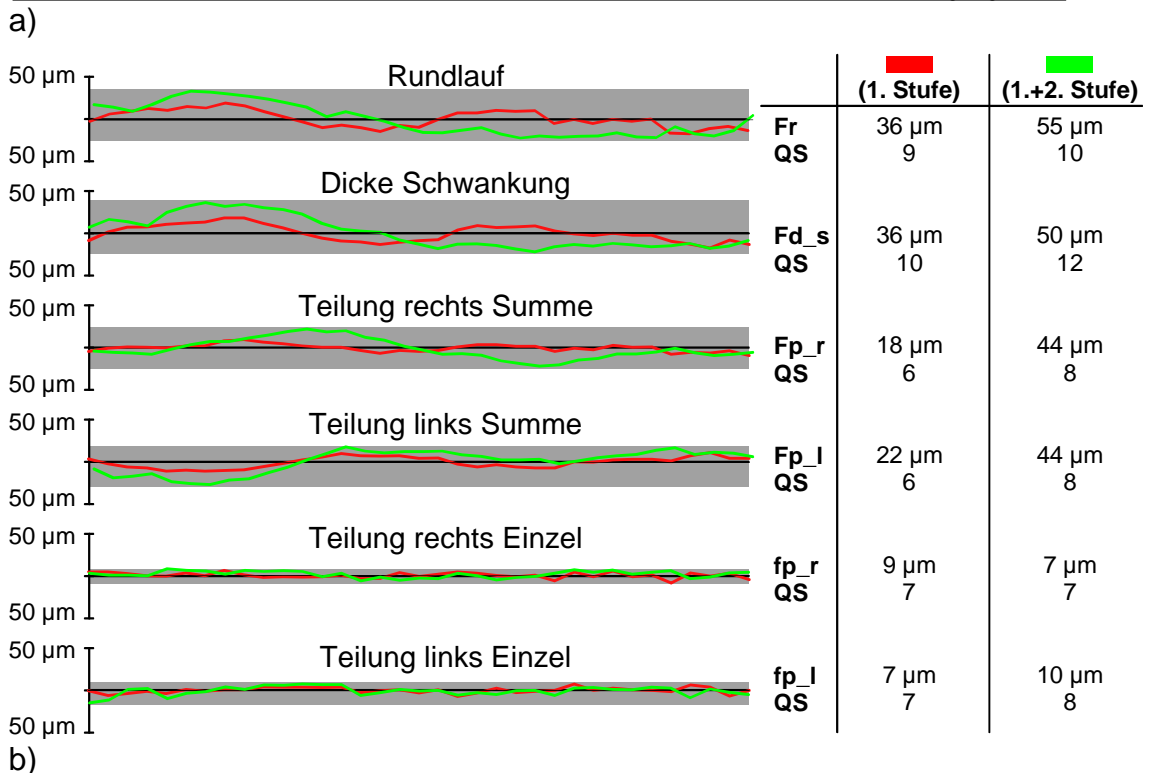
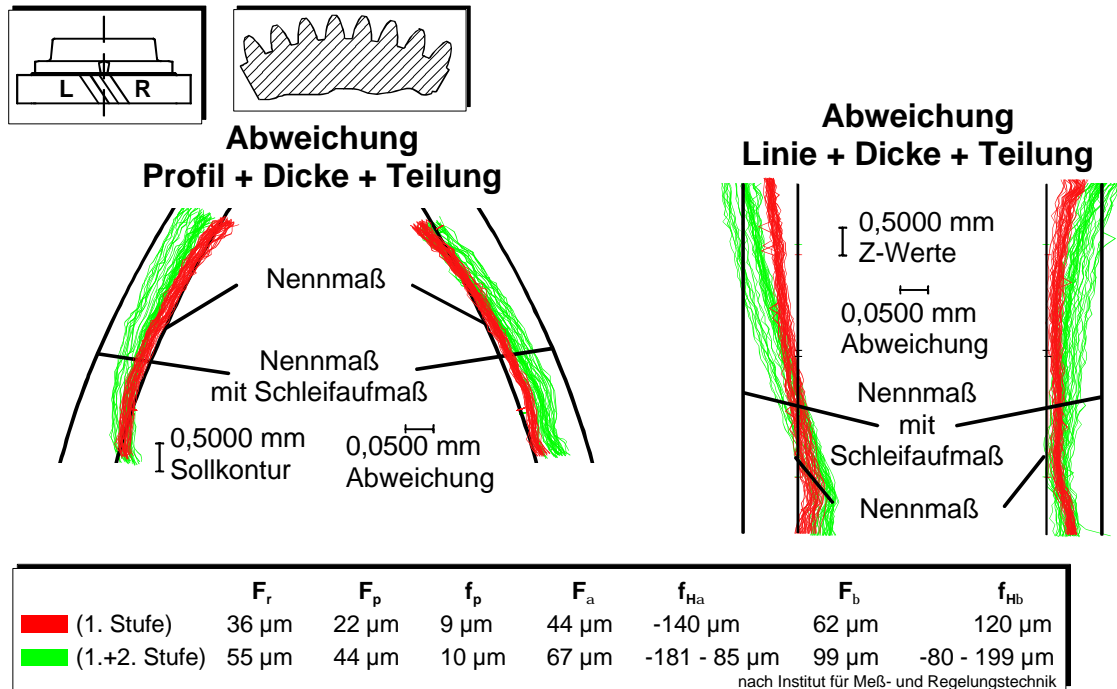


Bild 88: Messung der Laufverzahnung Vergleich erste und erste + zweite Stufe

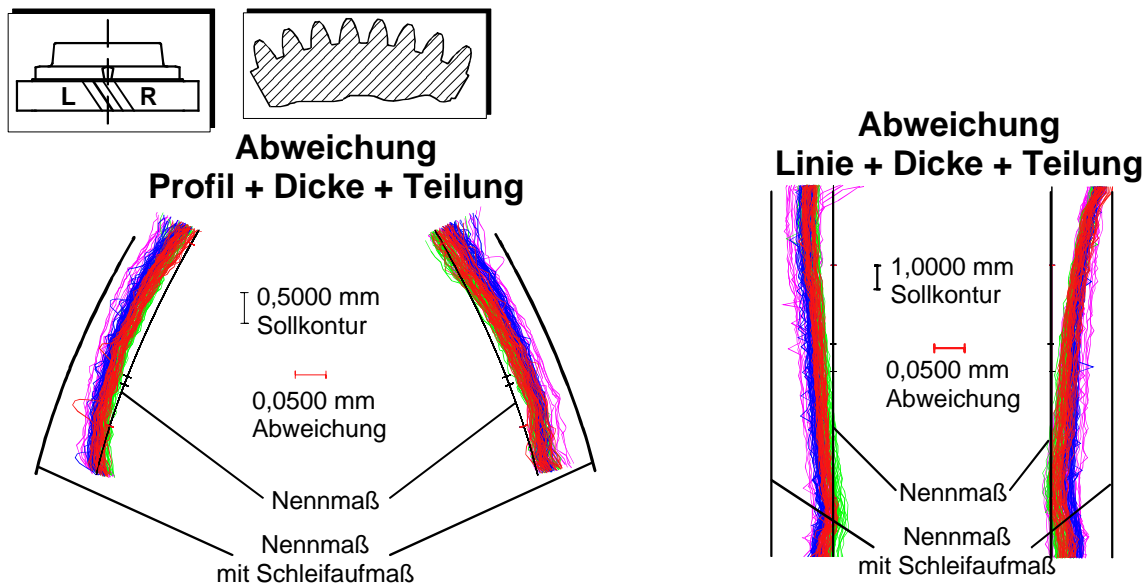
Die beiden Zahnräder, die in Bild 88 miteinander verglichen werden, wurden gegen Ende der Versuche geschmiedet. Aus diesem Grund ist an den Verzahnungsmessungen eine Abweichung zur Nenngeometrie abzulesen. Diese Abweichungen wurden bereits in Kapitel 6.3.1 beschrieben, weshalb im Folgenden lediglich auf die Unterschiede der beiden Verzahnungen eingegangen wird.

Das Bauteil, das nur in der ersten Stufe umgeformt wurde, weist eine Streubreite der Verzahnung von ca. 40 μm pro Zahnflanke auf. Die Verkipfung

der Flankenlinie ist auf die Abweichung der Matrizengeometrie und den Ausstoßprozess zurückzuführen.

Die Streuung des in beiden Stufen geschmiedeten Bauteils ist im Bereich der Laufverzahnung deutlich höher. Die Streuungen liegen hierbei im Bereich bis zu 100 µm. Außerdem sind die Abweichungen in der Darstellung der Flankenlinie in dem Bereich, der der partiellen Umformung der zweiten Stufe zugewandt ist (Anschlussbereich an die Laufverzahnung), größer. Dies lässt darauf schließen, dass die Geometrie der Laufverzahnung durch die Umformung der zweiten Stufe beeinflusst wird. Die Qualitätsstufen der Laufverzahnung können durch die Hinterschnitteinbringung um bis zu zwei Stufen beeinflusst werden (Bild 88 b). Dies ist durch das zu tiefe Hineinfahren der Schieber in das Werkstück zu erklären. Durch die gezielte Veränderung des Werkzeugseitigen Anschlages kann dies jedoch verhindert werden, wie die Darstellung in Bild 89 zeigt. Die Messungen von vier Bauteilen wurden übereinandergelegt, um die Streuung des Prozesses zu ermitteln. Es ergibt sich, dass die Prozessstreuung im Bereich von bis zu ca. 60 µm liegt.

Die Qualitätsstufen der einzelnen Verzahnungswerte sind in Bild 89 b dargestellt. Hierbei beträgt die Prozessstreuung ungefähr zwei Qualitätsstufen.



	F_r	F_p	f_p	F_a	f_{Ha}	F_b	f_{Hb}
max. Maximalwert	45,1 µm	56,2 µm	13,0 µm	58,0 µm	88,6 µm	85,5 µm	102,4 µm
min. Maximalwert	25,7 µm	21,1 µm	8,9 µm	47,0 µm	-129,0 µm	43,7 µm	-104,9 µm

nach Institut für Meß- und Regelungstechnik

a)

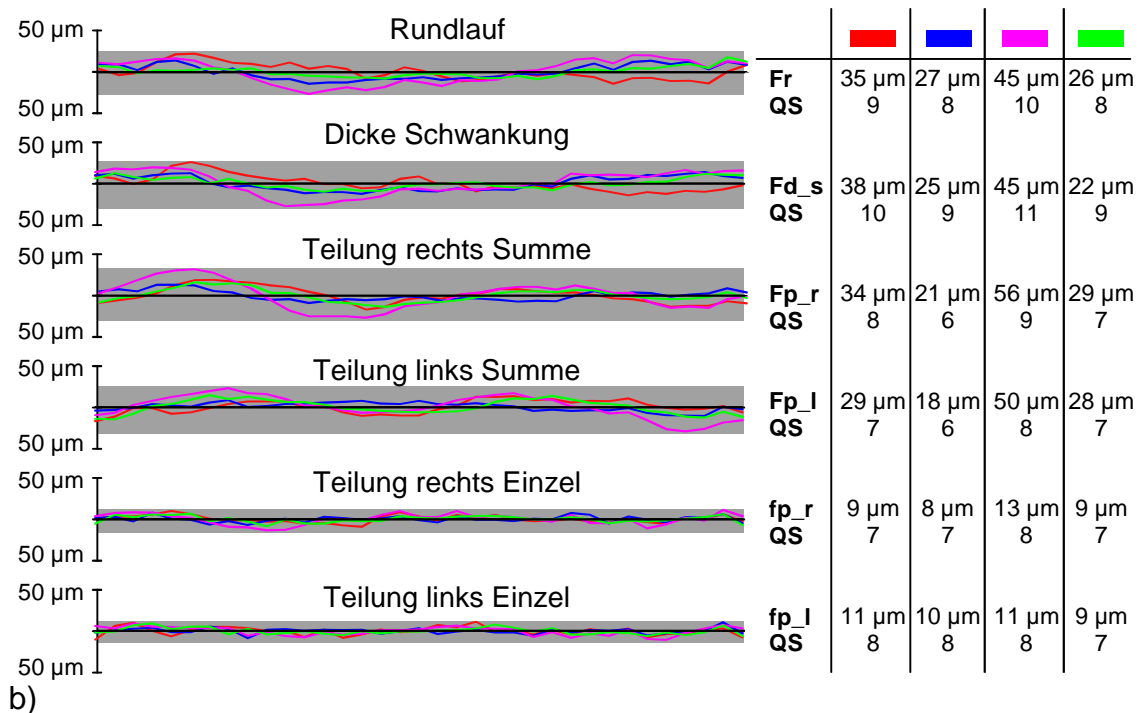


Bild 89: Streuung der Laufverzahnungsmessung (4 Bauteile, erste + zweite Stufe)

6.3.2.3 Bewertung der Umformergebnisse der zweiten Umformstufe

Durch das verwendete Werkzeugsystem der zweiten Umformstufe konnte der Hinterschnitt in die Kupplungsverzahnung reproduzierbar eingebracht werden (Bild 90).

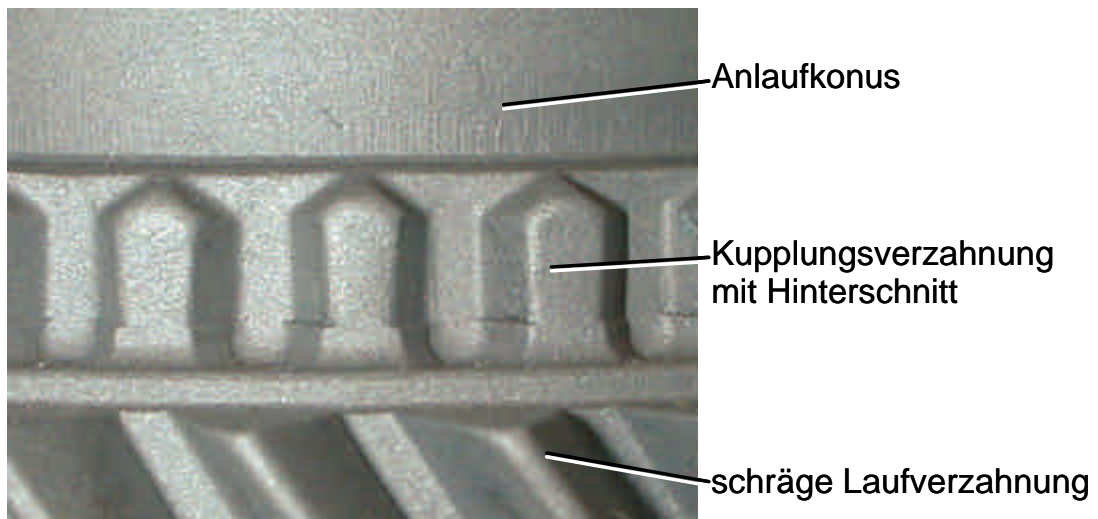


Bild 90: Erzeugter Hinterschnitt an der Kupplungsverzahnung eines Pkw-Gangrads

Die Qualität der Verzahnung lag hierbei im Bereich der Stufen IT 8 bis IT 12. Die Umformung in der zweiten Stufe beeinflusste die Geometrie der in der ersten Umformstufe bereits fertig geschmiedeten Laufverzahnung. Diese Beeinflussung liegt bei den gefertigten Bauteilen jedoch in einem tolerierbaren Bereich.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Die steigenden Anforderungen an die Wettbewerbsfähigkeit stellen produzierende Betriebe vor immer neue Herausforderungen. Neben der Notwendigkeit, vorhandene Fertigungsverfahren weiter zu optimieren, muss vermehrt die Möglichkeit genutzt werden, alternative Prozesse zur Herstellung bestehender Produkte zu nutzen.

Das Fertigungsverfahren Präzisionsschmieden ermöglicht die Verkürzung der bestehenden Prozessketten sowie die alternative Gestaltung der Bauteile. Hierdurch ergeben sich zum einen wirtschaftliche Vorteile in der Fertigung. Zum anderen kann eine Gewichts- und Baugrößenreduzierung erreicht werden. Diesem Ansatz folgend, wurde in dieser Arbeit die Herstellung von präzisionsgeschmiedeten Zahnrädern untersucht. Hierfür wurden grundlegende Versuche zur Formfüllung beim Schmieden von Verzahnungen durchgeführt. Folgende Erkenntnisse wurden daraus gewonnen:

- Je größer der Modul gewählt wird, desto geringer ist die maximal benötigte Umformkraft zur exakten Ausformung des Kopfkreises.
- Je größer der Eingriffswinkel der Verzahnung gewählt wird, desto geringer sind die notwendigen Umformkräfte.
- Die benötigte Zahnbreitenfüllung ist den Bedürfnissen einer optimalen Leistungsübertragung anzupassen. Hierbei ist die notwendige Zahnbreite auf ein Minimum zu begrenzen.

Aus diesen Hinweisen ergibt sich für die Auslegung von umformtechnisch günstig herzustellenden Verzahnungen die Forderung nach großem Modul und großem Eingriffswinkel sowie einer auf die Anforderungen des Getriebes angepassten Zahnfüllung.

Weiterhin wurde ein Verfahren zur Herstellung komplexer Antriebsbauteile durch Präzisionsschmieden am Beispiel eines Pkw-Gangrades entwickelt und dargestellt. Für die Auslegung der Prozesse im Vorfeld der Schmiedeversuche wurde die Finite-Elemente-Methode-Simulation (FEM) genutzt.

Die Anforderungen an das zu fertigende Pkw-Gangrad erforderten die Auslegung und Fertigung eines zweistufigen Werkzeugsystems. Hierdurch wurde es möglich, die komplexe, hinterschnittene Geometrie des Bauteils endkonturnah zu schmieden.

Die Aufteilung der exakten Abbildung des Bauteils auf die beiden Umformstufen erfolgte an Hand der unterschiedlichen Anforderungen an die Werkzeuge:

- In der ersten Umformstufe wird mit Hilfe eines kompakten Werkzeugs zum Präzisionsschmieden verzahnter Bauteile die komplexe, feingliedrige Geometrie hinterschnittfrei ausgeformt.
- Das Werkzeugsystem der zweiten Umformstufe wird durch eine radial geteilte Matrize geprägt. Dies ermöglicht die zerstörungsfreie Entnahme von hinterschnittenen Bauteilen. Der Hinterschnitt wird in dieser Umformstufe

aktiv durch Schieber Elemente, lokal auf die Umformzone an den Zahnflanken der Kupplungsverzahnung begrenzt, eingebracht.

Mit Hilfe des beschriebenen Präzisionsschmiedeverfahrens wurde innerhalb dieser Arbeit die endkonturnahe Fertigung des komplex gestalteten Pkw-Gangrades, welches für die spanende Fertigung konstruiert wurde, realisiert. Die Ergebnisse der Arbeit zeigen, dass das Präzisionsschmieden von verzahnten hochbelasteten Bauteilen innerhalb enger geforderter Toleranzen möglich ist. Durch fertigungsgerechte Konstruktion der herzustellenden Bauteile kann die Wirtschaftlichkeit des Präzisionsschmiedeverfahrens gesteigert werden. Hierdurch erscheint es möglich, die spanende Weichbearbeitung durch einen Präzisionsschmiedeprozess zu substituieren und die Prozesskette zu verkürzen. Im Anschluss an die umformtechnische Fertigung sind somit lediglich die Laufverzahnung, die Bohrung und die Anlageflächen durch einen Hartfeinbearbeitungsprozess (Harddrehen, Schleifen) nachzubearbeiten. Dies gibt Schmiedebetrieben die Möglichkeit, die Wertschöpfung im Bereich der Umformung weiter zu erhöhen, um so auch in der Zukunft weiter wettbewerbsfähig Produkte fertigen zu können.

8 Literaturverzeichnis

- /1/ Rudau, E. Deutsche Gesenkschmiedeindustrie gerüstet für die Zukunft.
Schmiede-Journal Sept. 2000
- /2/ Westerkamp, C.,
Weißmann, G. Präzisionsumformung – eine Schlüsseltechnologie für die Antriebstechnik.
VDI-Z Integrierte Produktion 139 (1997), 9,
S. 72-74
- /3/ Witt, S.,
Haats, J. Präzisionsschmieden.
VDI-Berichte Nr. 1137, 1994, S. 171-190
- /4/ Gold, R. The fundamentals of forging.
Precision Metal, May 1985
- /5/ Dohmann, F.,
Traudt, O. Herstellen von Stirnrädern durch
Präzisionsumformen.
Maschinenmarkt, 91 (1985), 80, S. 1565-1568
- /6/ Behrens, B.-A. Entwicklung eines automatisierten
Präzisionsschmiedeprozesses mit integrierter
Qualitätsprüfung.
Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 445. Düsseldorf:
VDI Verlag 1997
- /7/ Weismann, G. Präzisionsgeschmiedete Fahrzeugtriebteile.
VDI-Berichte Nr. 878, 1991, S.403-424
- /8/ Adlof, W. Schmiedeteile: Bedeutung, Gestaltung,
Herstellung, Anwendung.
Folien mit Textblättern. Informationsstelle
Schmiedestück-Verwendung im Industrieverband
Deutscher Schmieden e.V., Hagen: 1998
- /9/ Adams, B. Verfahren und Fertigungssystem zum
Präzisionsschmieden von Zylinderrädern.
Dissertation Universität Hannover, 1980
- /10/ Westerkamp, C. Präzisionsschmieden verzahnter
Antriebselemente am Beispiel schrägverzahnter
Zahnräder.
Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 427. Düsseldorf:
VDI Verlag 1997
- /11/ Bohnsack, R. Untersuchungen zum Präzisionsschmieden von
Laufverzahnungen.
Dissertation Universität Hannover, 1999
- /12/ N.N. Statistisches Jahrbuch 2001, Stuttgart: Metzler-
Poeschel, 2001

- /13/ König, W.,
Saljé, H.,
Röber, G. Tragfähigkeit pulvergeschmiedeter Zahnräder.
Industrieanzeiger, Jg. (1988), 25/26, S. 16-20
- /14/ Lindner, H. Präzisionsschmieden.
Werkstatt und Betrieb 116 (1983), 10, S. 605-609
- /15/ Roth, K. Evolventenverzahnungen mit extremen
Eigenschaften. Teil I-VI
Antriebstechnik 35 (1996) Nr. 5, 7, 9, 11
Antriebstechnik 36 (1997) Nr. 1, 3, 7 Seiten
- /16/ Hoferer, M.,
Lübben, Th.,
Majorek, A.,
Thoden, B.
Zoch, H.-W. Grundlagen der Maß- und
Formänderungsentstehung bei der
Wärmebehandlung.
Härterei-Technische-Mitteilungen 51 (1996), 1,
München: Carl-Hanser
- /17/ González-Baquet, I.,
et al. Influence of microalloying on the mechanical
properties of medium carbon forging steels after a
newly designed post forging treatment.
steel research 68 (1997), 12,
- /18/ Doege, E.,
et. al. Prozesskette zur Herstellung
präzisionsgeschmiedeter Hochleistungsbauteile.
DFG, Sonderforschungsbereich 1761, Erstantrag,
1999
- /19/ Keppler-Ott, T.,
Siegert, K. Compensation of the press frame expansion for
cold extrusion tools.
VDI-Berichte Nr. 1555, 2000, S. 119-135
- /20/ Doege, E.,
Nägele, H. Simulation of the precision forging process of
straight fluted spur gears with the finite element
method.
Production Engineering, (1995), Band 2, Heft 2,
S. 59-62
- /21/ Sadeghi, M. H.,
Dean, T. A. Precision forging straight and helical spur gears.
Journal of Materials Processing Technology, 45
(1994), Heft 1-4, S. 25-30
- /22/ Kawasaki, Y.,
Marumo, N.,
Nishioka, T.,
Kubo, A. Development of a new production system for high-
precision, low-cost gears of automobile manual
transaxles under high-volume production.
International Journal of the Japan Society for
precision Engineering, 30 (1996), 1, S. 1-5
- /23/ Eyercioglu, Ö.,
Dean, T. A. Design and manufacture of precision gear forging
dies.
International Conference and Exhibition on Design
and Production of Dies and Molds. Tagungsband.
Istanbul, 1997, S. 311-316

- /24/ Altan, T.,
Thomas, W.,
Vazquez, V.,
Koc, M. Simulation of metal forming processes –
application and future trends.
Advanced Technology of Plasticity, Vol. I,
Proceedings of the 6th ICTP, 19.-24. Sept. 1999
- /25/ Doege, E.,
Haferkamp, H.,
Bach, F.-W.,
et al. Präzisionsumformung schrägverzahnter
Zahnräder – Herstellung, Wärmebehandlung und
Prüfung – Teil 1.
VDI-Z Integrierte Produktion 138 (1998), 1/2,
S. 56-61
- /26/ Rohmert, J. Fachgebiete in Jahresübersichten – Verzahnen.
VDI-Z Integrierte Produktion 139 (1997), 10,
S. 36-43
- /27/ N.N. Schmiedeprodukte für die Automobilindustrie.
Ingenieur-Werkstoffe, 6 (1997), 2, S. 30-31
- /28/ Osakada, K. New methods of precision forging.
Advanced Technology of Plasticity, Vol. II,
Proceedings of the 6th ICTP, 19.-24. Sept. 1999,
S. 735-740
- /29/ N.N. *Patentschrift DE 3134 857 C2*
Bayrisches Leichtmetallwerk Graf Blücher von
Wahlstatt GmbH & Co KG, München
- /30/ N.N. *Patentschrift DE 3427 156 C2*
Bayrisches Leichtmetallwerk Graf Blücher von
Wahlstatt GmbH & Co KG, München
- /31/ Lindner, H. Das Präzisionsschmieden – ein Sonderverfahren
der Warmformgebung.
VDI-Berichte Nr. 544, Jahr, S. 177-196
- /32/ Douglas, R.,
Kuhlmann, D. Guidelines for precision hot forging with
applications.
Journal of Materials Processing Technology,
98 (2000), Heft, S. 182-188
- /33/ Gutmann, P.,
Butz, F. F. Leicht und belastbar: Präzisionsgeschmiedete
Getriebeteile.
Umformtechnik Jg. (1999), 4, S. 16-18
- /34/ Bausch, T. Moderne Zahnradfertigung: Verfahren und
Maschinen zur kostengünstigen Herstellung von
Stirn- und Kegelrädern mit hoher Qualität.
Renningen-Malmsheim: expert, 1994

- /35/ Dohmann, F. Heutiger Stand der Herstellung von Verzahnungen und Verzahnungsprofilen. 8. Internationalen Kongress: Kaltmassivumformung. Seminarband, Nürnberg: Verlag, 1990.
- /36/ Schöck, J., Kammerer, M. Verzahnungsherstellung durch Kaltfließpressen. Umformtechnik Jg. (1999), 4, S. 36-42
- /37/ Lange, K. Umformtechnik. Handbuch für Industrie und Wirtschaft. Band 1-4, Aufl., Berlin Heidelberg, New York, Tokio: Springer, 1984
- /38/ Krapfenbauer, H. Kaltwalzen von Innen- und Außenverzahnungen. Umformtechnik 26 (1992) Heft, Seiten
- /39/ Jütte, F., Sonnenberg, M. Fließpressen von Mehrfachverzahnungen. Umformtechnik (1997), 1, S. 26-29
- /40/ Koll, W. Kaltfließpressen von Bauteilen mit Verzahnungen. Dissertation RWTH Aachen, 1990
- /41/ Doege, E., Bohnsack, R. Press concept for the future in precision forging. Advanced Technology of Plasticity, Vol. I, Proceedings of the 6th ICTP, 19.-24. Sept. 1999, S. 203-210
- /42/ Bauer, D.; Krebs, R. Anwendung der Taguchi-Methode bei der Auslegung von Tiefziehprozessen. QZ 39 (1994), S. 311-341
- /43/ Bauer, D.; Krebs, R. Wiederholung erforderlich
Zeitschriftenaufsatz: Qualität und Zuverlässigkeit, Band 41 (1996) Heft6, Seiten 698-700,702-704
- /44/ Krottmeier, J. Versuchsplanung. Der Weg zur Qualität des Jahres 2000.
Ort: TÜV Rheinland, 1990
- /45/ Wallacher, J. Einsatz von Methoden der statistischen Versuchsplanung zur Bestimmung von robusten Faktorkombinationen in der präventiven Qualitätssicherung.
Fortschr.-Ber. VDI Reihe 16 Nr. 70. Düsseldorf: VDI Verlag 1994
- /46/ Gimpel, B. Qualitätsgerechte Optimierung von Fertigungsprozessen.
Dissertation RWTH Aachen, 1991
- /47/ Sachs, L. Angewandte Statistik.
Berlin, Heidelberg, New York, Tokio: Springer, 1992

- /48/ Scheffler, E. Einführung in die Praxis der statistischen Versuchsplanung.
Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1974
- /49/ Doege, E., Neubauer, I. Berechnung der Werkzeugbelastung beim Präzisionsschmieden von Zahnrädern.
Umformtechnik 32 (1998), 4, S. 48-50
- /50/ Doege, E., Haferkamp, H., Bach, F.-W., et al. Präzisionsumformung schrägverzahnter Zahnräder – Herstellung, Wärmebehandlung und Prüfung – Teil 2.
VDI-Z Integrierte Produktion 138 (1998), 4, S. 62-64
- /51/ Doege, E., et al. Präzisionsschmieden schrägverzahnter Zahnräder.
Umformtechnik 32 (1998), 1, S. 30-34
- /52/ Doege, E., et al. Präzisionsschmieden schrägverzahnter Zahnräder.
Umformtechnik 30 (1996), 4, S. 206-210
- /53/ Mathieu, H., Gogoll, A. Erweitertes CAD/CAM – Konstruktion von Matrizen zum Präzisionsschmieden von Zahnrädern.
Form + Werkzeug, (1999), 2, S.
- /54/ Tönshoff, H.-K., Türich, A., Jagodzinski, V. Bohrungsbearbeitung präzisionsgeschmiedeter Stirnzahnräder.
Antriebstechnik 36 (1997), 9, S. 78-81
- /55/ Muckelbauer, M. Entwicklung eines Systems zur funktionsorientierten Schmiedekonstruktion.
Fortschr.-Ber. Reihe 2 Nr. 315. Düsseldorf: VDI Verlag 1999
- /56/ Doege, E., Meyer-Nolkemper, H., Saeed, I. Fließkurven-Atlas metallischer Werkstoffe.
München, Wien: Carl Hanser, 1986
- /57/ Doege, E., et. all Präzisionsumformung von Schrägverzahnten Zahnrädern, Herstellung, Wärmebehandlung und Prüfung.
Abschlußbericht Forschergruppe Do 190/92, Hannover 1999
- /58/ Höhn, B.-R. Gestaltung von Verzahnungsgeometrien für die Umformtechnik.
Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt 1997

Lebenslauf

Name, Vorname:	Dreyer, Guido
Geboren am:	17. Juni 1969 in Hannover
Familienstand:	verheiratet
Schulbildung	
1975 – 1979	Grundschule Langenäcker / Barsinghausen
1979 – 1981	Orientierungsstufe Langenäcker / Barsinghausen
1981 – 1989	Ganztagsgymnasium Barsinghausen
Mai 1989	Abitur
Wehrdienst	
Juni 1989 – September 1990	Grundwehrdienst Celle / Scheuen
Studium	
Oktober 1990 – September 1996	Maschinenbau, Fachrichtung und Entwicklungs- und Konstruktionstechnik, Universität Hannover
Juli 1996 – September 1996	Erstellung der Diplomarbeit mit dem Thema “Innovative Ansätze zur Prozess- überwachung in der Umformtechnik“
Studienbegleitende Tätigkeit	
Januar 1992 – Oktober 1996	Tätigkeit als Studentische Hilfskraft am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen der Universität Hannover in den Abteilungen <i>Umformmaschinen</i> und <i>Schmieden</i>
Berufliche Tätigkeit	
seit November 1996	wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Abteilung Schmieden
Juli 1997 – Juni 1998	stellvertretender Abteilungsleiter Schmieden
seit April 1998	stellvertretender Oberingenieur
seit Januar 2000	Oberingenieur